

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Aleksandra Bajac

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ISPITIVANJE ULTRAZVUČNOG MJERILA ROTOKA

Mentor:

Prof. dr. sc. Davor Zvizdić, dipl. ing.

Studentica:

Aleksandra Bajac

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se profesoru dr.sc. Davoru Zvizdić na prihvaćenom mentorstvu, pruženoj pomoći i korisnim savjetima tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se dipl. ing. Josipu Pasanec na ustupljenom ultrazvučnom mjerilu protoka, asistentu Alenu Jurišinec na ustupljenim informacijama vezanim uz rad linija u Laboratoriju za procesna mjerenja, te Ivanu i Vladimiru Bek na pomoći prilikom izvođenja mjerenja na mjernoj liniji.

Aleksandra Bajac



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Datum 19-09-2016 Prilog
Klasa: 602-04/16-6/3
Ur.broj: 15-1703 16-337

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: Aleksandra Bajac Mat. br.: 0035137935

Naslov rada na hrvatskom jeziku: Ispitivanje ultrazvučnog mjerila protoka

Naslov rada na engleskom jeziku: Testing of ultrasonic flowmeter

Opis zadatka:

Za potrebe mjerenja protoka potrebno je ispitati karakteristike i točnost prijenosnog ultrazvučnog mjerila protoka korištenjem postojeće mjerne linije u Laboratoriju za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje koje su bazirane na gravimetrijskom principu i na magneto-induktivnom principu. Ispitivanja treba koncipirati za mjerenja u statičkim uvjetima.

U radu je potrebno:

- Opisati princip ultrazvučne, gravimetrijske i magneto-induktivne metode za mjerenje volumnog i masenog protoka.
- Opisati i izraditi skicu gravimetrijskih mjernih linija za mjerenje protoka vode u LPM-u sa potrebnim prilagodbama za ispitivanje ultrazvučnog mjerila protoka.
- Izraditi plan mjerenja sa načinom zapisivanja i obrade mjernih podataka i sa procjenom mjerne nesigurnosti.
- Prikazati rezultate ispitivanja uz njihov grafički i tablični prikaz.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

25. studenog 2015.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Davor Zvizdić

Rok predaje rada:

1. rok: 25. veljače 2016

2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.

3. rok: 17. rujna 2016.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016

2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.

3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ	II
POPIS SLIKA	IV
POPIS TABLICA.....	V
POPIS GRAFOVA.....	VI
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY	X
1. UVOD.....	1
1.1. Podjela mjerila protoka	1
2. ULTRAZVUČNA METODA MJERENJA PROTOKA	3
2.1. Metoda mjerenja vremena prolaza	5
2.2. Metoda mjerenja frekvencijskog pomaka	8
3. MAGNETNO - INDUKTIVNA METODA MJERENJA PROTOKA.....	10
4. GRAVIMETRIJSKA METODA MJERENJA PROTOKA.....	13
4.1. Statička metoda mjerenja [4]	13
4.1.1. Metoda mirnog starta (start/stop metoda)	13
4.1.2. Metoda letećeg starta	14
4.2. Dinamička metoda mjerenja [4].....	15
5. LABORATORIJ ZA PROCESNA MJERENJA.....	16
5.1. Mjerna linija JUSTUR MT 10/15-40 [6]	16
5.2. Mjerna linija JUSTUR G2T 90/50-100 [6].....	16
5.3. Opis mjerenja na mjernim linijama.....	17
6. ULTRAZVUČNO MJERILO PROTOKA	21
6.1. Preporuke za instalaciju ultrazvučnog mjerila protoka [7]	23
7. PROVEDBA I REZULTATI MJERENJA	27
7.1. Plan mjerenja.....	27
7.2. Priprema i provedba mjerenja	28
7.3. Rezultati mjerenja	29
8. MJERNA NESIGURNOST	38
8.1. Metoda procjene mjerne nesigurnosti tipa A	38
8.2. Metoda procjene mjerne nesigurnosti tipa B	39
8.3. Procjena kombinirane mjerne nesigurnosti.....	40
8.4. Mjerna nesigurnost rezultata kod gravimetrijske i ultrazvučne metode mjerenja	41
8.4.1. Procjena mjerene nesigurnosti tipa A	41
8.4.2. Procjena mjerene nesigurnosti tipa B.....	44
8.4.3. Kombinirana mjerena nesigurnost rezultata	44
8.4.4. Proširena mjerena nesigurnost rezultata	45
9. ZAKLJUČAK.....	48

LITERATURA.....	49
PRILOZI.....	50

POPIS SLIKA

Slika 1.	Brzina širenja ultrazvučnih valova u fluidu [1]	3
Slika 2.	Princip mjerenja vremena prolaza [2]	5
Slika 3.	Princip mjerenja frekvencijskog pomaka [2]	8
Slika 4.	Princip rada magnetno-induktivnog mjerila protoka [3]	11
Slika 5.	Princip mjerenja metodom mirnog starta [5]	14
Slika 6.	Princip mjerenja metodom letećeg starta [5]	15
Slika 7.	Shema mjerne linije G2T 90/50-100	17
Slika 8.	Dio ispitne klupe mjerne linije G2T 90/50-100 s priključenim mjerilom protoka	18
Slika 9.	Dva magnetno - induktivna protokomjera mjerne linije G2T 90/50-100	19
Slika 10.	Spremnik na vagi mjerne linije G2T 90/50-100.....	20
Slika 11.	Ispitivano ultrazvučno mjerilo protoka [7].....	21
Slika 12.	Ispitivano ultrazvučno mjerilo protoka priključeno na mjernoj liniji u laboratoriju..	22
Slika 13.	Preporuke za mjesta postavljanja primopredajnika na cjevovode [9]	23
Slika 14.	Prikaz V-metode postavljanja primopredajnika [9]	24
Slika 15.	Prikaz W-metode postavljanja primopredajnika [9]	25
Slika 16.	Prikaz Z-metode postavljanja primopredajnika [9]	25
Slika 17.	Primjer postavljanja primopredajnika na cijev na mjernoj liniji	26
Slika 18.	Primopredajnici M2H korišteni pri mjerenju	27

POPIS TABLICA

Tablica 1. Rezultati mjerenja za nominalni volumen 500 dm ³	29
Tablica 2. Razlike mjerenja za nominalni volumen 500 dm ³	30
Tablica 3. Rezultati mjerenja za nominalni volumen 300 dm ³	32
Tablica 4. Razlike mjerenja za nominalni volumen 300 dm ³	33
Tablica 5. Rezultati mjerenja za nominalni volumen 150 dm ³	34
Tablica 6. Razlike mjerenja za nominalni volumen 150 dm ³	35
Tablica 7. Proširena mjerna nesigurnost	45

POPIS GRAFOVA

Graf 1.	Prikaz rezultata mjerenja za nominalni volumen 500 dm ³	30
Graf 2.	Prikaz razlika očitanih vrijednosti volumena za nominalni volumen 500 dm ³	31
Graf 3.	Prikaz razlika očitanih vrijednosti volumnog protoka za nominalni volumen 500 dm ³	31
Graf 4.	Prikaz rezultata mjerenja za nominalni volumen 300 dm ³	32
Graf 5.	Prikaz razlika očitanih vrijednosti volumena za nominalni volumen 300 dm ³	33
Graf 6.	Prikaz razlika očitanih vrijednosti volumenog protoka za nominalni volumen 300 dm ³	34
Graf 7.	Prikaz rezultata mjerenja za nominalni volumen 150 dm ³	35
Graf 8.	Prikaz razlika očitanih vrijednosti volumena za nominalni volumen 150 dm ³	36
Graf 9.	Prikaz razlika očitanih vrijednosti volumnog protoka za nominalni volumen 150 dm ³	36
Graf 10.	Srednje razlike očitanih vrijednosti volumena za tri nominalna volumena	37
Graf 11.	Srednje razlike očitanih vrijednosti volumnog protoka za tri nominalna volumena	37
Graf 12.	Usporedba rezultata gravimetrijske i ultrazvučne metode s proširenom mjernom nesigurnosti za nominalni volumen 500 dm ³	46
Graf 13.	Usporedba rezultata gravimetrijske i ultrazvučne metode s proširenom mjernom nesigurnosti za nominalni volumen 300 dm ³	46
Graf 14.	Usporedba rezultata gravimetrijske i ultrazvučne metode s proširenom mjernom nesigurnosti za nominalni volumen 150 dm ³	47

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
q_v	m^3/s	volumni protok
q_m	kg/s	maseni protok
A	m^2	površina presjeka cijevi
v_{sr}	m/s	srednja brzina strujanja fluida
ρ	kg/m^3	gustoća fluida
f	Hz	frekvencija
c	m/s	brzina zvuka
λ	m	valna duljina
Z	$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$	impedancija sredstva
t_N	s	vrijeme prolaza ultrazvučnog vala u smjeru strujanja fluida
t_U	s	vrijeme prolaza ultrazvučnog vala u smjeru suprotnom od smjera strujanja fluida
l	m	dužina prolaza ultrazvučnog vala
φ	rad	kut prolaza ultrazvučnog vala u odnosu na uzdužnu os cijevi
Δt	s	razlika u vremenima prolaza ultrazvučnog vala
d	m	unutarnji promjer cijevi
f_i	Hz	frekvencija odaslanog ultrazvučnog vala
f_r	Hz	frekvencija reflektiranog ultrazvučnog vala
θ	rad	kut upada i refleksije ultrazvučnog vala u odnosu na uzdužnu os cijevi
e	V	inducirana elektromotorna sila
B	T	gustoća magnetskog toka
l	m	duljina vodiča
v	m/s	brzina vodiča kroz magnetsko polje
V_{uz}	m^3	ukupna količina volumena fluida koja je protekla kroz ultrazvučno mjerilo protoka
m_{vaga}	kg	masa fluida u spremniku na vagi
V_{vaga}	m^3	volumen fluida u spremniku na vagi
t	s	vrijeme trajanja ispitivanja
$q_{v,uz}$	m^3/h	volumni protok kroz ultrazvučno mjerilo protoka
$q_{v,vaga}$	m^3/h	volumni protok određen gravimetrijskom metodom
x_m	ovisno o mjeranju	aritmetička sredina
x_i	ovisno o mjeranju	vrijednost pojedinog mjerenja
n	-	broj ponovljenih mjerenja

d_i	ovisno o mjeranju	devijacija pojedine vrijednosti mjerenja od aritmetičke sredine
\bar{d}	ovisno o mjeranju	prosječna devijacija
$s(x_i)$	ovisno o mjeranju	standardna devijacija
$s(\bar{x}_i)$	ovisno o mjeranju	standardna devijacija srednje vrijednosti
$u_A(x_i)$	ovisno o mjeranju	standardna mjerna nesigurnost metodom procjene tipa A
$u_B(x_i)$	ovisno o mjeranju	standardna mjerna nesigurnost metodom procjene tipa B
$u_c(y)$	ovisno o mjeranju	kombinirana mjerna nesigurnost
$U(y)$	ovisno o mjeranju	proširena mjerna nesigurnost
k	-	faktor prekrivanja

SAŽETAK

U radu je za potrebe ispitivanja ultrazvučnog mjerila protoka provedeno usporedno mjerenje volumnog protoka ultrazvučnom metodom i gravimetrijskom metodom na gravimetrijskoj mjernoj liniji u Laboratoriju za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Na početku kao uvod kratko su definirani pojmovi volumnog i masenog protoka, te je dan okvirna podjela različitih mjerila protoka. Nakon uvoda detaljnije je opisan princip ultrazvučne metode mjerenja volumnog protoka, te dvije ultrazvučne metode najčešće korištene u industriji metoda mjerenja vremena prolaza i metoda mjerenja frekvencijskog pomaka. Sljedeće je bio opisan princip magnetno - induktivne metode mjerenja volumnog protoka. Nakon ove dvije metode opisana je i gravimetrijska metoda mjerenja protoka, te su kratko objašnjenje statička i dinamička metoda mjerenja. Kako je ispitivanje vršeno u Laboratoriju za procesna mjerenja dan je opis mjernih linija koje se nalaze u laboratoriju. Ultrazvučno mjerilo protoka koje je ispitivano u radu je isto detaljnije opisano uz preporuke za instalaciju ultrazvučnih mjerila protoka.

Nakon teoretskog dijela opisana je priprema i provedba usporednog mjerenja ultrazvučnim mjerilom protoka i gravimetrijskom metodom. Rezultati mjerenja prikazani su tablično i grafički, nakon čega je provedena procjena mjerne nesigurnosti metodama tipa A i B. Izračunata je proširena mjerna nesigurnost rezultata obje metode mjerenja, koja je isto prikazana tablično i grafički.

Ključne riječi: mjerenje protoka, ultrazvučno mjerilo protoka, ultrazvučna metoda mjerenja protoka, magnetno - induktivna metoda mjerenja protoka, gravimetrijska metoda mjerenja protoka, mjerna nesigurnost

SUMMARY

In this paper, for the purpose of testing the ultrasonic flow meter simultaneous flow rate measurement using ultrasonic measurement method and gravimetric measurement method was conducted using the gravimetric measuring line located in the Laboratory for Process Measurement of the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb.

Firstly, as an introduction, brief definitions of volume and mass flow rate, with a short overview of various flow meters, were given. Secondly, after the introduction, the principle of ultrasonic measurement method of volume flow rate was described in more detail. Two ultrasonic measurement methods commonly used in the industry, transit time method and the frequency shift method, were also described. Following, the principle of electromagnetic measurement method was described. After the overview of those two methods, gravimetric measurement was also described, including brief explanations of static and dynamic methods. Considering that the testing of ultrasonic flow meter was performed in the Laboratory for Process Measurement, descriptions of measuring lines located in the said laboratory were given as well. Furthermore, as the subject of this paper, the ultrasonic flow meter was described with stated recommendations for the installation.

After the theoretical part, the preparation and implementation of simultaneous ultrasonic and gravimetric measurements were given. The measurement results were shown in tables and graphs, and the standard uncertainty using type A and type B evaluation methods was calculated. In the end, the expanded uncertainties for the results of both methods were calculated and shown in tables and graphs.

Key words: flow measurement, ultrasonic flow meter, ultrasonic flow measurement method, electromagnetic flow measurement method, gravimetric flow measurement, measurement uncertainty

1. UVOD

Mjerenje protoka u zatvorenim cjevovodima primjenjuje se u raznim aplikacijama u industriji gdje je točnost mjerenja od ključne važnosti za proces, bilo da je riječ o određivanju energetske i masene bilance procesa, bilo da se koriste za kontrolu i nadzor rada procesa. Kada se govori o mjerenju protoka najčešće se misli na mjerenje volumnog protoka (m^3/s , m^3/h , l/s , l/min ,...) ili na mjerenje masenog protoka (kg/s , kg/h , t/h ,...).

Volumni protok q_v definira se kao volumen fluida V koji u jediničnom vremenu t proteče kroz poznatu površinu, a određuje se pomoću srednje brzine strujanja fluida v_{sr} kroz poznatu površinu presjeka cijevi A prema jednadžbi (1):

$$q_v = A \cdot v_{sr} \quad (1)$$

Gdje je:

q_v - volumni protok [m^3/s]

A - površina presjeka cijevi [m^2]

v_{sr} - srednja brzina strujanja fluida [m/s]

Maseni protok q_m definira se kao masa fluida koja u jediničnom vremenu proteče kroz poznatu površinu, a određuje se pomoću volumnog protoka q_v i gustoće fluida ρ prema jednadžbi (2):

$$q_m = q_v \cdot \rho \quad (2)$$

Gdje je:

q_m - maseni protok [kg/s]

ρ - gustoća fluida [kg/m^3]

Gustoća je konstantna kod nestlačivih fluida (tekućina), dok je kod stlačivih fluida (plinova) gustoća funkcija temperature i tlaka.

1.1. Podjela mjerila protoka

Postoji više različitih načina mjerenja protoka, koje se prema izvedbama mogu podijeliti na:

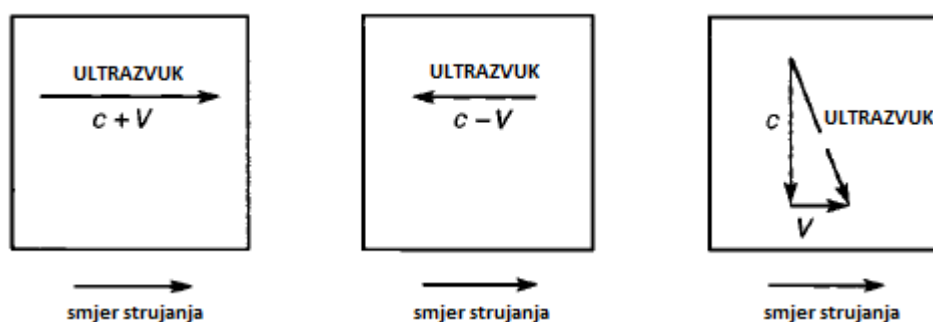
1. Tlačno - diferencijalna mjerila protoka, poput mjerne prigušnice, Venturijeve, Dallove i Pitotove cijevi
2. Mehanička mjerila protoka, poput rotametra i mjerne turbine

3. Elektronička mjerila protoka, poput ultrazvučnih mjerila, magnetno - induktivnih mjerila, mjerila protoka vrtloženjem ili turbulencijom
4. Masena mjerila protoka, poput Coriolisovog mjerila protoka, termodinamičkog mjerila protoka i mjerila protoka s vrućom žicom

U ovome radu bit će pobliže opisane ultrazvučna mjerila, odnosno ultrazvučna metoda mjerenja protoka, magnetno - induktivna mjerila, odnosno magnetno - induktivna metoda mjerenja protoka i gravimetrijska metoda mjerenja, koja se zbog svoje velike točnosti najčešće koristi za umjeravanje drugih mjerila protoka.

2. ULTRAZVUČNA METODA MJERENJA PROTOKA

Ultrazvučna metoda mjerenja protoka primjenjuje se za mjerenje volumnog protoka fluida koji struje kroz cijevi. Ova metoda mjerenja protoka, kao što joj ime govori, koristi ultrazvučne valove za mjerenje brzine fluida. Ultrazvučni valovi su valovi čije su frekvencije iznad gornje granice čujnosti za ljudsko uho, odnosno zvučni valovi frekvencija iznad 20,000 Hz. Ultrazvučna metoda mjerenja protoka temelji se na činjenici da brzina prostiranja ultrazvučnih valova u fluidu koji struji ovisi o brzini zvuka u fluidu i brzini strujanja samog fluida [Slika 1].



Slika 1. Brzina širenja ultrazvučnih valova u fluidu [1]

Za mjerenje volumnog protoka koriste se ultrazvučni valovi frekvencija od 100 kHz (za plinove) do 2 MHz (za tekućine). Odnos frekvencije f , brzine zvuka c i valne duljine λ može se izraziti jednačinom (3):

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (3)$$

Gdje je:

f - frekvencija [Hz]

c - brzina zvuka [m/s]

λ - valna duljina [m]

Iz gornje jednačine vidljivo je da su frekvencija i valna duljina obrnuto proporcionalne, odnosno što je veći iznos frekvencije to će biti manji iznos valne duljine. Valne duljine ultrazvuka u zraku pri frekvencijama od 100 kHz su reda veličine milimetra, dok pri frekvencijama od 1 MHz govorimo o djelićima milimetra. U tekućinama valne duljine se dodatno smanjuju za faktor od približno 4,5. Kao izvori ultrazvuka koriste se pretvarači pomoću kojih se najčešće električna energija pretvara u akustičnu energiju, pri čemu razlikujemo magnetnostriktivne pretvarače za

ultrazvučne valove nižih frekvencija i piezoelektrične pretvarače za ultrazvučne valove viših frekvencija.

Unutar piezoelektričnog pretvarača nalazi se piezoelektrični kristal (kvarc, kristali Na-K tartarata i dr.). Piezoelektrični kristali izrađuju se rezanjem pod određenim kutom, a u izmjeničnom električnom polju se šire i skupljaju, odnosno titraju i na taj način odašilju ultrazvučne valove. Ovi kristali služe i kao izvori (odašiljači) i kao prijamnici ultrazvučnih valova. U područjima nižih frekvencija dimenzije pretvarača su često nešto manje od valne duljine, pa je usmjerena karakteristika odaslanih ultrazvučnih valova kuglastog oblika. Pri višim frekvencijama gdje su dimenzije pretvarača približno jednake valnoj duljini ultrazvučni valovi poprimaju izgled usko usmjerenog snopa. Zbog bolje definiranog puta rasprostiranja vala preferira se odašiljanje ultrazvučnih valova u obliku usko usmjerenog snopa.

Ultrazvuk na granici između dva različita sredstva (npr. između dva fluida ili fluida i krutine) se jednim dijelom odbija (reflektira), a jednim dijelom prolazi (transmisija) u drugo sredstvo. Omjer između prolaza i refleksije ovisi o impedanciji sredstva. Impedancija Z je jednaka umnošku gustoće sredstva ρ i brzine zvuka u sredstvu c prema jednadžbi (4):

$$Z = \rho \cdot c \quad (4)$$

Gdje je:

Z - impedancija sredstva [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$]

ρ - gustoća sredstva [kg/m^3]

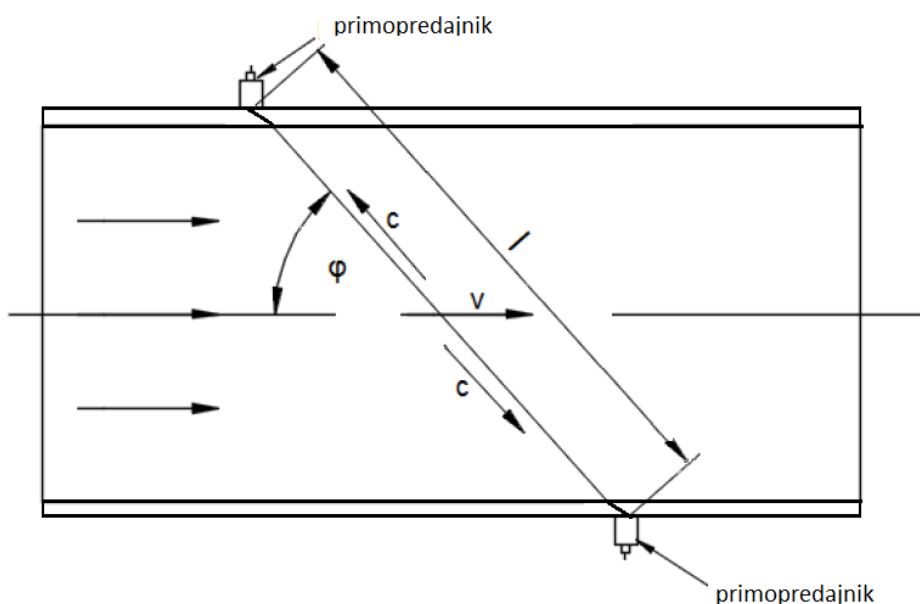
c - brzina zvuka u sredstvu [m/s]

Prolaz kroz granicu između sredstava bit će veći ako su impedancije dva sredstva bliske po iznosima. Plinovi imaju vrlo male iznose impedancije u usporedbi s tekućinama i krutinama. Može se zaključiti da je teško odaslati ultrazvučni val kroz zrak u krutinu i obrnuto, dok je s druge strane moguće odaslati ultrazvučni val iz krutine kroz tekućinu i obrnuto. Na granici sredstva između plina i krutine odbija se gotovo sva ultrazvučna energija, zbog toga se pri mjerenju protoka ultrazvukom na mjestima dodira između primopredajnika i stjenke cijevi mora nanositi neka tekućina kao kontaktno sredstvo za poboljšanje prolaza ultrazvučnih valova.

Razlikujemo dvije osnovne metode mjerenja volumnog protoka fluida uz pomoć ultrazvučnih valova, metodu na principu mjerenja vremena prolaza i metodu na principu mjerenja frekvencijskog pomaka.

2.1. Metoda mjerenja vremena prolaza

Mjerila protoka vremena prolaza mjere razliku u vremenu prolaza ultrazvučnih valova u smjeru strujanja fluida i u smjeru suprotnom od strujanja fluida kroz cijev [Slika 2]. Uobičajeno se ultrazvučni valovi odašilju pod određenim kutom u odnosu na uzdužnu os cijevi, osim kada se radi o mjerenju protoka u cijevima malih poprečnih presjeka kod kojih se valovi odašilju uz uzdužnu os cijevi. Za mjerenje se koriste parovi primopredajnika, od kojih svaki sadrži piezoelektrični kristal.



Slika 2. Princip mjerenja vremena prolaza [2]

Jednadžbe za određivanje vremena prolaza ultrazvučnog vala u smjeru strujanja fluida, u smjeru suprotnom od smjera strujanja fluida i razlike u vremenima prolaza su sljedeće:

$$t_N = \frac{l}{c + v_{sr} \cdot \cos \varphi} \quad (3)$$

$$t_U = \frac{l}{c - v_{sr} \cdot \cos \varphi} \quad (4)$$

$$\Delta t = t_U - t_N = \frac{2l \cdot v_{sr} \cdot \cos \varphi}{c^2 - v_{sr}^2 \cdot \cos^2 \varphi} \quad (5)$$

Gdje je:

t_N - vrijeme prolaza ultrazvučnog vala u smjeru strujanja fluida [s]

t_U - vrijeme prolaza ultrazvučnog vala u smjeru suprotnom od smjera strujanja fluida [s]

l - dužina prolaza ultrazvučnog vala, odnosno udaljenost između primopredajnika [m]

φ - kut prolaza ultrazvučnog vala u odnosu na uzdužnu os cijevi [rad]

c - brzina zvuka u fluidu u cijevi [m/s]

v_{sr} - srednja brzina strujanja fluida u cijevi [m/s]

Δt - razlika u vremenima prolaza ultrazvučnog vala [s]

Uz pretpostavku da je srednja brzina strujanja fluida kroz cijev v_{sr} puno manja od brzine zvuka u fluidu c :

$$v_{sr} \ll c$$

Jednadžba (5) može se napisati u pojednostavljenom obliku:

$$\Delta t = t_U - t_N = \frac{2l \cdot v_{sr} \cdot \cos \varphi}{c^2} \quad (6)$$

Iz čega slijedi izraz za srednju brzinu strujanja fluida u cijevi:

$$v_{sr} = \frac{c^2 \cdot \Delta t}{2l \cdot \cos \varphi} \quad (7)$$

Uz poznatu površinu presjeka cijevi A i izračunatu srednju brzinu strujanja fluida v_{sr} , prema jednadžbi (7), moguće je izračunati volumni protok fluida q_v :

$$A = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \quad (8)$$

$$q_v = A \cdot v_{sr} = \frac{d^2 \cdot \pi \cdot c^2 \cdot \Delta t}{8l \cdot \cos \varphi} \quad (9)$$

Gdje je:

A - površina presjeka cijevi [m²]

d - unutarnji promjer cijevi [m]

S obzirom na vrstu ugradnje razlikujemo mjerila za ugradnju s vanjske strane cijevi, tzv. suhi tip ugradnje (engl. nonwetted) i mjerila za ugradnju s unutarnje strane cijevi, tzv. mokri tip ugradnje (engl. wetted). Mjerila za vanjsku ugradnju mogu se koristiti za povremena mjerenja protoka. Posebno su korisna za primjenu u energetici na već postojećim cjevovodima, jer se jednostavno

postavljaju s vanjske strane cijevi bez zaustavljanja procesa ili dodatnih zahvata na postojećim cjevovodima. Pogodni su za velike raspone promjera cijevi i za montiranje na teško dostupna mjesta s malo prostora između instalacija. Kada materijal stijenke cijevi omogućava prostiranje ultrazvučnih valova preferira se vanjski tip ugradnje. Za mjerenje protoka u cijevima od materijala koji onemogućavaju širenje ultrazvučnih valova i za mjerenje protoka plinova primjenjuje se unutarnji tip ugradnje. U tim slučajevima primopredajnici se ugrađuju u posebno izrađene dijelove cijevi (engl. metering spools) koji se zatim ugrađuju kao dijelovi postojećih cjevovoda.

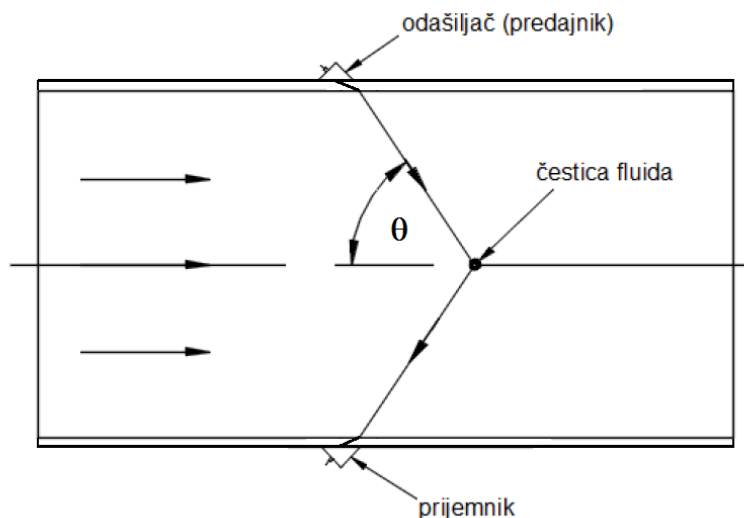
Mjerenje volumnog protoka fluida ultrazvučnim mjerilima vremena prolaza pripada u skupinu neinvazivnih metoda mjerenja, jer nema elemenata koji bi ometali protok fluida, niti uzrokovali pad tlaka. Ova mjerila su sigurna, jednostavna za instalaciju i korištenje, a budući da nemaju pokretnih dijelova i da primopredajnici nisu podložni trošenju ni eroziji, te da imaju mogućnost samodijagnoze problema (provjerom kvalitete i jakosti signala) jednostavni su i relativno jeftini za održavanje.

Koriste se za mjerenje volumnog protoka čistih tekućina, poput vode, ulja (nafta, ulje za podmazivanje), napitaka i raznih kemikalija (alkohola, kiselina, otopina), koje ne smiju sadržavati značajnije koncentracije mjehurića ili suspendiranih krutih tvari, koje ograničavaju širenje ultrazvučnih valova unutar fluida jer bi u tom slučaju ultrazvučni valovi biti preslabi za prolazak kroz cijev. Protok tekućina može se mjeriti u cijevima promjera od 20 mm do 6 m za brzine protoka od 0,03 do 10 m/s ili više, za raspone temperatura od -200 do +260°C (standard do 110°C) i tlakove do 200 bara. Mogu se koristiti i za mjerenje volumnih protoka plinova i pare za promjere cijevi do 10 m, brzine protoka od 0,3 do 45 m/s, i raspone temperatura od -50 do +500°C s tlakovima koji mogu ići i do 1500 bar.

Ugradnjom primopredajnika s vanjske strane cijevi izbjegnuto je dodir s opasnim fluidima, zbog čega je ova metoda pogodna i za mjerenje protoka abrazivnih, korozivnih, radioaktivnih i zapaljivih fluida. Iz istog razloga izbjegnuta je i kontaminacija fluida koji struji kroz cijev pa se ova metoda primjenjuje i u farmaceutskoj i prehrambenoj industriji. Točnosti ovih mjerila iznose oko ± 1 do $\pm 2\%$.

2.2. Metoda mjerenja frekvencijskog pomaka

Mjerila protoka koja rade na principu mjerenja frekvencijskog pomaka mjere razliku u frekvencijama odaslanih i reflektiranih ultrazvučnih valova [Slika 3]. U slučaju kada fluid struji kroz cijev frekvencije reflektiranih valova nisu jednake frekvencijama odaslanih valova zbog utjecaja tzv. Dopplerovog efekta, odnosno promjene u opaženoj frekvenciji izvora zvuka zbog relativnog gibanja između opažača i izvora zvuka. Razlika između frekvencija raste s porastom brzine strujanja fluida.



Slika 3. Princip mjerenja frekvencijskog pomaka [2]

Frekvencijski pomak rezultat je refleksije ultrazvučne zrake od zvučno reflektivnih materijala, poput krutih čestica ili mjehurića u fluidu koji struji kroz cijev. Glavni preduvjet za primjenu ove ultrazvučne metode mjerenja je postojanje suspendiranih krutih čestica ili mjehurića u dovoljnim količinama u fluidu. Predajnik odašilje ultrazvučni val u fluid koji struji brzinom v_{sr} . Krute čestice ili mjehurići u fluidu, za koje se pretpostavlja da se kreću istom brzinom reflektirati će ultrazvučni val prema prijemniku, pri čemu dolazi do frekvencijskog pomaka između odaslanih i reflektiranih ultrazvučnih valova.

Srednja brzinu strujanja fluida u cijevi izračunava se prema jednadžbi (10):

$$v_{sr} = \frac{c \cdot (f_i - f_r)}{2l \cdot f_i \cos \theta} \quad (10)$$

Gdje je:

f_i - frekvencija odaslanog ultrazvučnog vala [Hz]

f_r - frekvencija reflektiranog ultrazvučnog vala [Hz]

θ - kut upada i refleksije ultrazvučnog vala u odnosu na uzdužnu os cijevi [rad]

Mjerila frekvencijskog pomaka koriste za mjerenje protoka raznih suspenzija u rudarstvu, u industriji za mjerenje protoka otpadnih voda, morske vode, papirne pulpe, kiselina, emulzija, u prehrambenoj industriji za mjerenje protoka voćnih sokova, jogurta. U medicini se koriste za mjerenje protoka krvi.

Mjerila frekvencije pomaka su relativno jeftina. Obično se izrađuju kao mjerila za vanjsku ugradnju, ali postoje i mjerila kod kojih su predajnik i prijamnik već ugrađeni u cijev pri čemu je izbjegnut problem neujednačene debljine stjenke. Predajnik i prijemnik mogu biti ugrađeni zajedno u istom kućištu ili mogu biti u zasebnim kućištima te se mogu instalirati jedan pored drugog na istoj strani cijevi kod cijevi velikih promjera ili na suprotnih stranama kod cijevi malih promjera. Primjenjuju se za brzine strujanja od 0,3 to 6 m/s, u temperaturnom rasponu od -20 to 80°C.

Točnost mjerila ovisi o instalaciji, profilu strujanja, ujednačenosti debljine stjenke cijevi, broju i veličini krutih čestica ili mjehurića i točnosti s kojom je poznata brzina zvuka u fluidu. Točna mjerenja mogu se postići samo pomnim umjeravanjem mjerila za svaku pojedinačnu primjenu. Točnost ovih mjerila protoka je oko $\pm 5\%$.

3. MAGNETNO - INDUKTIVNA METODA MJERENJA PROTOKA

Magnetno - induktivna metoda mjerenja protoka zasniva se na principu Faradayevog zakona elektromagnetske indukcije, a primjenjuje se za mjerenje volumnog protoka električni vodljivih tekućina. Elektromagnetska indukcija je pojava stvaranja (induciranja) napona u vodiču koji se giba unutar magnetskog polja kao rezultat promjene magnetskog toka. Faradayev zakon opisuje pojavu elektromotorne sile (EMS) e na krajevima ravnog vodiča dužine l , uslijed njegovog kretanja brzinom v u magnetskom polju indukcije B , u smjeru okomitom na smjer magnetskog polja.

$$e = B \cdot l \cdot v \quad (11)$$

Gdje je:

e - inducirana elektromotorna sila, odnosno inducirani napon [V]

B - gustoća magnetskog toka [T]

l - duljina vodiča [m]

v - brzina vodiča kroz magnetsko polje [m/s]

U slučaju magnetno - induktivnih mjerila protoka ulogu vodiča preuzima fluid koji struji kroz cijev mjerila promjera d . Faradayev zakon u tom slučaju može se napisati kao:

$$e = B \cdot d \cdot v_{sr} \quad (12)$$

Gdje je:

d - unutarnji promjer cijevi [m]

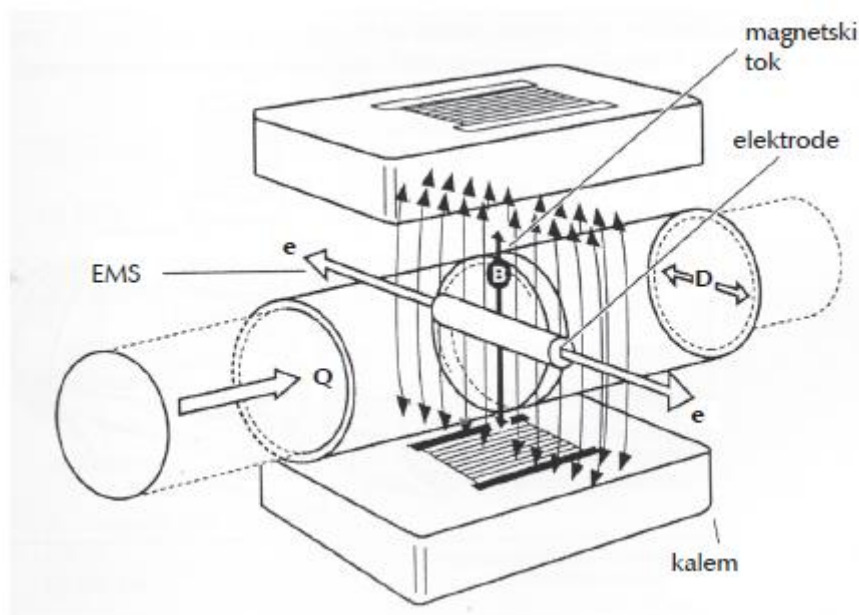
v_{sr} - srednja brzina strujanja fluida [m/s]

Iz jednadžbe (12) slijedi da je srednja brzina v_{sr} , odnosno volumni protok fluida q_v , direktno proporcionalan induciranom naponu e na elektrodama:

$$v_{sr} = \frac{e}{B \cdot d} \quad (13)$$

$$q_v = A \cdot v_{sr} = \frac{d \pi \cdot e}{4B} \quad (14)$$

Magnetno - induktivna mjerila protoka [Slika 4] izrađuju se kao zasebni dijelovi cijevi od nemagnetnih materijala (npr. nehrđajući čelik), koji se ugrađuju na cjevovod kod kojeg postoji zahtjev za mjerenjem volumnog protoka.



Slika 4. Princip rada magnetno-induktivnog mjerila protoka [3]

Oko vanjskog promjera na suprotnim stranama cijevi nalaze se zavojnice, koje generiraju izmjenično magnetsko polje (da bi se izbjegla trajna polarizacija elektroda) čiji je smjer okomit na smjer strujanja fluida kroz cijev. Strujanjem fluida presijeca se magnetsko polje, što rezultira induciranjem izmjeničnog napona koji je proporcionalan brzini fluida. Unutar same stijenke cijevi ugrađene su dvije točkaste (5 do 20 mm promjera) elektrode, koje mjere inducirani napon. Elektrode se smještaju na suprotnim stranama cijevi okomito na smjer strujanja fluida i magnetskog polja. Priljubljene su uz stjenku cijevi, da ne bi ometale protok fluida s kojim su u doticaju, ali su pri tome izolirane od same cijevi. Zbog toga što se nalaze u izravnom dodiru s fluidom materijal od kojih se izrađuju elektrode mora biti pomno odabran, za neagresivne fluide često se koriste elektrode od nehrđajućeg čelika, ostali materijali mogu biti legure iridij-platina (za korozivne tekućine), tantal, titan, cirkon (za agresivne tekućine). Sama cijev mjerila je istog promjera kao i cjevovod u koji se ugrađuje, pri čemu se promjeri cijevi kreću u rasponima od 2 mm do 3 m. Unutrašnjost cijevi je izolirana da ne bi došlo do kratkog spoja između elektroda. Materijal izolacije može biti od različitih električno nevodljivih materijala ovisno o tipu primjene, poput gume, neoprena, elastomera, teflona, čak i keramike. Za elektrode se koristi izmjenična struja ili u novije vrijeme pulsirajuća istosmjerna struja.

Neki proizvođači preporučaju instalaciju na vertikalnim cijevima s uzvodnim tokom strujanja, što osigurava da eventualni mjehurići zraka unutar tekućine ne dođu u dodir s elektrodama, pri čemu bi cijev trebala biti potpuno ispunjena tekućinom.

Ova metoda mjerenja protoka ubraja se među neinvazivne metode, ne uzrokuje pad tlaka fluida, nema pokretnih dijelova, vrlo je pouzdana, nije posebno osjetljiva na promjene gustoće, temperature, tlaka i viskoznosti fluida, potrošnja električne energije je vrlo mala (15 do 20 W), a pogodna je za mjerenje i vrlo malih protoka (srednje brzine protoka do 0,3 m/s). Za razliku od nekih drugih mjerila protoka magnetno - induktivno mjerila odlikuju se linearnom karakteristikom u cijelom mjernom opsegu. Točnost ovih mjerila iznosi $\pm 1,5\%$.

Magnetno - induktivna mjerila koriste se za mjerenje volumnog protoka električni vodljivih tekućina. Tekućine čiji se protok mjeri moraju imati električnu vodljivost u granicama od najmanje 50 do 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Zbog zahtjeva za vodljivošću ne mogu se koristiti za mjerenje protoka destilirane vode, ugljikovodika (nafta, benzin), plinova i pare. Ostali nedostaci su im relativno visoka cijena, neproporcionalnost veličine samog mjerila i iznosa protoka za koji su namijenjeni, pa tako mjerila za mjerenje malih protoka mogu biti dosta glomazna. Zbog izloženosti elektroda moguće je da dođe do taloženja naslaga na njihovim površinama, zbog čega se javlja potreba za njihovim čišćenjem. Za tekućine čijim strujanjem kroz cijev dolazi do formiranja izolacijskog sloja na stjenkama cijevi i prekida kontakta između elektroda i same tekućine razvijena su mjerila kod kojih su elektrode smještene izvan same cijevi i nisu u dodiru s tekućinom. Takve elektrode su pločastog oblika i velike površine, dizajnirane kao kondenzatorske ploče za takozvano kapacitivno primanje signala. Ovaj tip mjerila može se koristiti i za mjerenja protoka tekućina s niskom vodljivošću, čime se granica minimalne vodljivosti tekućine pomiče i do 0,05 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Primjena ovih mjerila protoka je vrlo široka, mogu se koristiti za mjerenje protoka raznih vrsta tekućina. Mjerenje protoka kiselina, lužina, raznih vodenih otopina moguće je zbog izolacije cijevi izrađene od materijala otpornih na koroziju. Iz istog razloga mjerila su pogodna i za mjerenja teških suspenzija i abrazivnih tekućina, poput blata, otpadnih voda iz kanalizacije, tekućina drvne i papirne industrije, jer su materijali poput poliuretana, neoprena i gume otporni na trošenje i eroziju. Koriste se i kao mjerila protoka u prehrambenoj industriji za mlijeko, sokove, pivo, ali i u nuklearnim elektranama za mjerenje protoka radioaktivnih tekućina.

4. GRAVIMETRIJSKA METODA MJERENJA PROTOKA

Gravimetrijska metoda ubraja se u metode mjerenja masenog protoka tekućina, a radi na principu vaganja mase tekućine i određivanja vremena koje je bilo potrebno za protjecanje te mase. Zbog visoke točnosti mjerenja gravimetrijska metoda se primarno koristi u laboratorijima za umjeravanje drugih vrsta mjerila masenog ili volumnog protoka. Mjerila protoka umjeravaju se putem gravimetrijske metode vaganjem količine tekućine prikupljene u spremniku za vrijeme trajanja ispitnog mjerenja. Spremnik se prvo važe prazan, a nakon toga pun i zatim se izračunava razlika u težini spremnika, koja odgovara masi prikupljene tekućine u spremniku. Volumen tekućine se određuje dijeljenjem mase tekućine sa gustoćom tekućine, koja je ovisna o vrijednostima temperature i tlaka tekućine tijekom provedbe ispitnog mjerenja.

Vage koje se koriste kod ove metode se umjeravaju putem prepoznatih standarda mase. Uzimajući u obzir sve nesigurnosti (određivanje gustoće, itd.) na nekim mjernim linijama korištenjem gravimetrijske metode za umjeravanje mjerila volumnog protoka, mogu se postići točnosti od $\pm 0,05\%$ ili bolje. Gravimetrijske metode mjerenja mogu se podijeliti na statičke i na dinamičke metode mjerenja.

4.1. Statička metoda mjerenja [4]

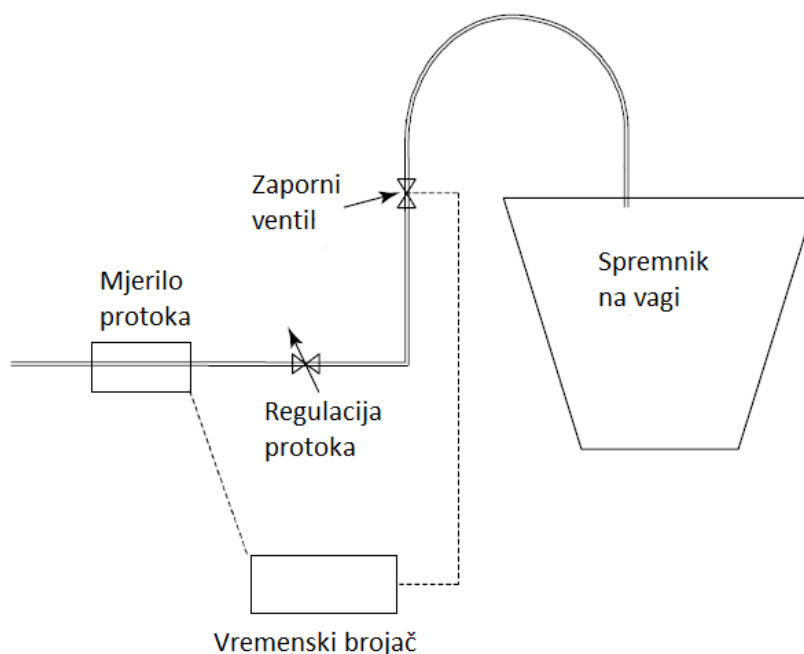
Statičke metode mjerenja mogu se podijeliti na metode mirnog starta i metode letećeg starta. Obje metode rade na principu prikupljanja tekućine u spremniku tijekom određenog vremenskog intervala i određivanja mase i volumena prikupljene tekućine.

4.1.1. *Metoda mirnog starta (start/stop metoda)*

Mjerna linija puni se tekućinom radi odzračivanja i uspostavljanja željene vrijednosti protoka. Nakon početnog punjenja linije tekućinom, protok kroz mjernu liniju, odnosno ispitnu klupu s priključenim mjerilima protoka koja se ispituju, se zaustavlja putem brzo zatvarajućeg ventila. Vrijednosti na mjerilima protoka postavljaju se na nulu, slučajno zaostala tekućina iz spremnika na vagi prazni se putem ispusnog ventila. Ispusni ventil se ponovno zatvara, a otvara se brzo zatvarajući ventil i započinje ispitivanje. Tekućina struji kroz mjernu liniju, kroz ispitnu klupu i mjerila protoka i skuplja se u spremniku na vagi. Nakon što je prošlo određeno vrijeme, odnosno nakon što je određeni iznos protoka prošao kroz mjernu liniju, mjerenje se zaustavlja. Mjeri se

masa tekućine u spremniku na vagi, iz koje je uz poznatu gustoću moguće izračunati volumen tekućine u

spremniku i uz poznato izmjereno vrijeme mjerenja dolazi se do vrijednosti volumnog protoka tekućine kroz mjernu liniju [Slika 5]. Izračunata vrijednost volumnog protoka uspoređuje se sa vrijednošću volumnog protoka očitanom na ispitivanom mjerilu protoka, te se izračunava pogreška i utvrđuje da li ispitivano mjerilo zadovoljava.



Slika 5. Princip mjerenja metodom mirnog starta [5]

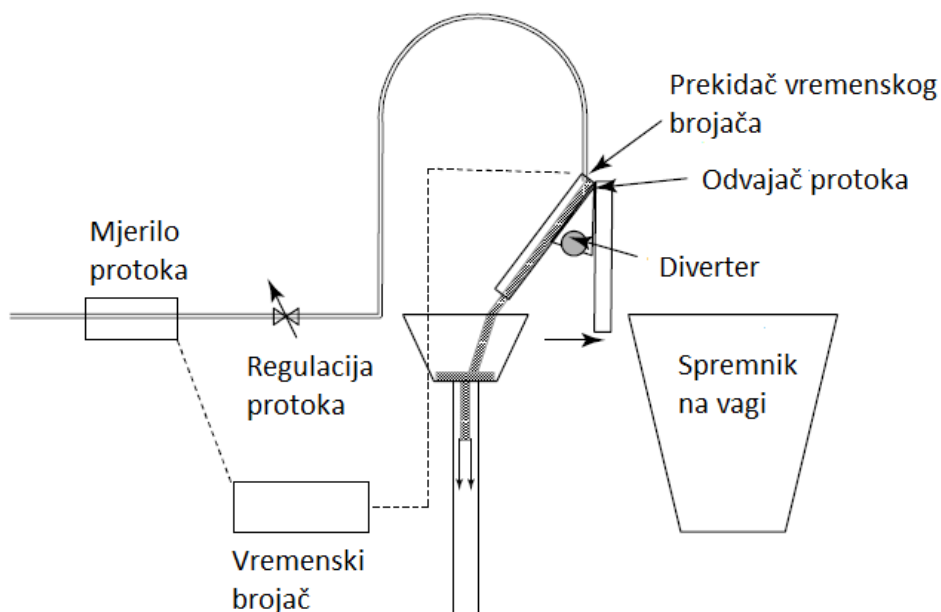
Mjerila protoka koja se umjeravaju metodom mirnog starta moraju imati brzo vrijeme odziva na promjene protoka. U slučaju mjerila protoka sa sporim vremenom odziva mjerenje počinje nakon što je već otvoren brzo zatvarajući ventil i završava kratko vrijeme nakon što je mjerenje zaustavljeno, što može rezultirati određenom greškom mjerenja.

Ova metoda je najjednostavnija metoda umjeravanja mjerila protoka, a može se koristiti za umjeravanje visoke ili niske točnosti. Visoke točnosti primjenom ove metode mjerenja ne mogu se postići za slučaj mjerenja koja traju kraće od 60 sekundi.

4.1.2. Metoda letećeg starta

Mjerna linija puni se tekućinom kao i kod metode mirnog starta, ali za razliku od nje kod metode letećeg starta nakon početnog punjenja i uspostavljanja željene vrijednosti protoka nema zaustavljanja protoka kroz mjernu liniju. Tekućina struji neometano kroz mjernu liniju i mjerila

protoka koja se ispituju u međuspremnik tekućine. U trenutku početka mjerenja smjer strujanja tekućine prebacuje se pomoću divertera sa protoka u međuspremnik na protok u spremnik na vagi. Nakon određenog vremena mjerenje se zaustavlja na način da se strujanje pomoću divertera ponovno vraća na protok u međuspremnik. Prebacivanje divertera automatski pokreće i zaustavlja vrijeme mjerenja [Slika 6].



Slika 6. Princip mjerenja metodom letećeg starta [5]

Mehanizam preokretanja divertera mora imati što bolji odziv da bi vremenska pogreška mjerenja bila što manja. Dobar dizajn divertera omogućava smanjivanje vremena mjerenja na samo 30 sekundi. Ova metoda koristi se za umjeravanje mjerila protoka sa sporim vremenima odziva.

4.2. Dinamička metoda mjerenja [4]

Dinamička metoda mjerenja je metoda kod koje je protok konstantan ne samo kroz mjerilo protoka koje se ispituje nego i kroz spremnik na vagi pomoću kojeg se vrši umjeravanje mjerila. Tekućina struji kroz mjernu liniju i spremnik na vagi s otvorenim ispusnim ventilom. Ispusni ventil se zatim zatvara da bi mjerenje moglo početi, mjerenje započinje kada rastuća razina ili masa tekućine u spremniku na vagi dosegne prethodno definiranu vrijednost. Mjerenje se zaustavlja kada razina ili masa tekućine dosegne drugu prethodno definiranu vrijednost. Očitava se proteklo vrijeme mjerenja te se ponovno otvara ispusni ventil i tekućina istječe iz spremnika na vagi. Ova metoda najčešće se koristi za umjeravanja male točnosti, ponovljivost je slaba 0,5 do 1%, osobito za veće sustave.

5. LABORATORIJ ZA PROCESNA MJERENJA

Laboratorij za procesna mjerenja (LPM) Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu ima dvije mjerne linije proizvođača JUSTUR za umjeravanje mjerila protoka za hladnu i toplu vodu i mjerila toplinske energije korištenjem gravimetrijske metode, MT 10/15-40 i G2T 90/50-100.

5.1. Mjerna linija JUSTUR MT 10/15-40 [6]

Mjerna linija MT 10/15-40 služi za umjeravanje mjerila protoka za raspone od 0,006 do 9 m³/h korištenjem metode mirnog starta (start/stop metoda), odnosno za raspone od 0,006 do 10 m³/h korištenjem metode letećeg starta. Maksimalni radni tlak mjerne linije iznosi 10 bara uz radne temperature vode od 10 do 65 °C.

Pripadajuća ugrađena magnetno - induktivna mjerila protoka su sljedeća:

KHRONE IFS 5000 nazivnog promjera DN2,5 za protoke od 0,006 do 0,1 m³/h;

KHRONE IFM 1080 nazivnog promjera DN10 za protoke od 0,1 do 1 m³/h;

MERIS MP 203 nazivnog promjera DN25 za protoke od 1 do 10 m³/h.

Instalirana vaga za mjerenje mase vode je proizvod METTLER - TOLEDO KCC 150, klase točnosti II, s razlučivošću od 10 grama. Masa vode na vagi koja se može mjeriti iznosi od 5 do 150 kg. Ispitna klupa omogućuje ispitivanje mjerila protoka tople i hladne vode i mjerila toplinske energije nazivnih promjera od DN15 do DN40, pri čemu se istovremeno mogu ispitivati od maksimalno deset mjerila za najmanji promjer DN15 do maksimalno četiri mjerila za najveći promjer DN40.

5.2. Mjerna linija JUSTUR G2T 90/50-100 [6]

Mjerna linija G2T 90/50-100 služi za umjeravanje mjerila protoka za raspone od 0,09 do 90 m³/h korištenjem metode mirnog starta (start/stop metoda) i metode letećeg starta. Maksimalni radni tlak kao i kod prethodne mjerne linije iznosi 10 bara uz radne temperature vode od 10 do 65 °C.

Pripadajuća ugrađena magnetno - induktivna mjerila protoka su sljedeća:

KHRONE IFS 1080 nazivnog promjera DN10 za protoke od 0,09 do 0,9 m³/h;

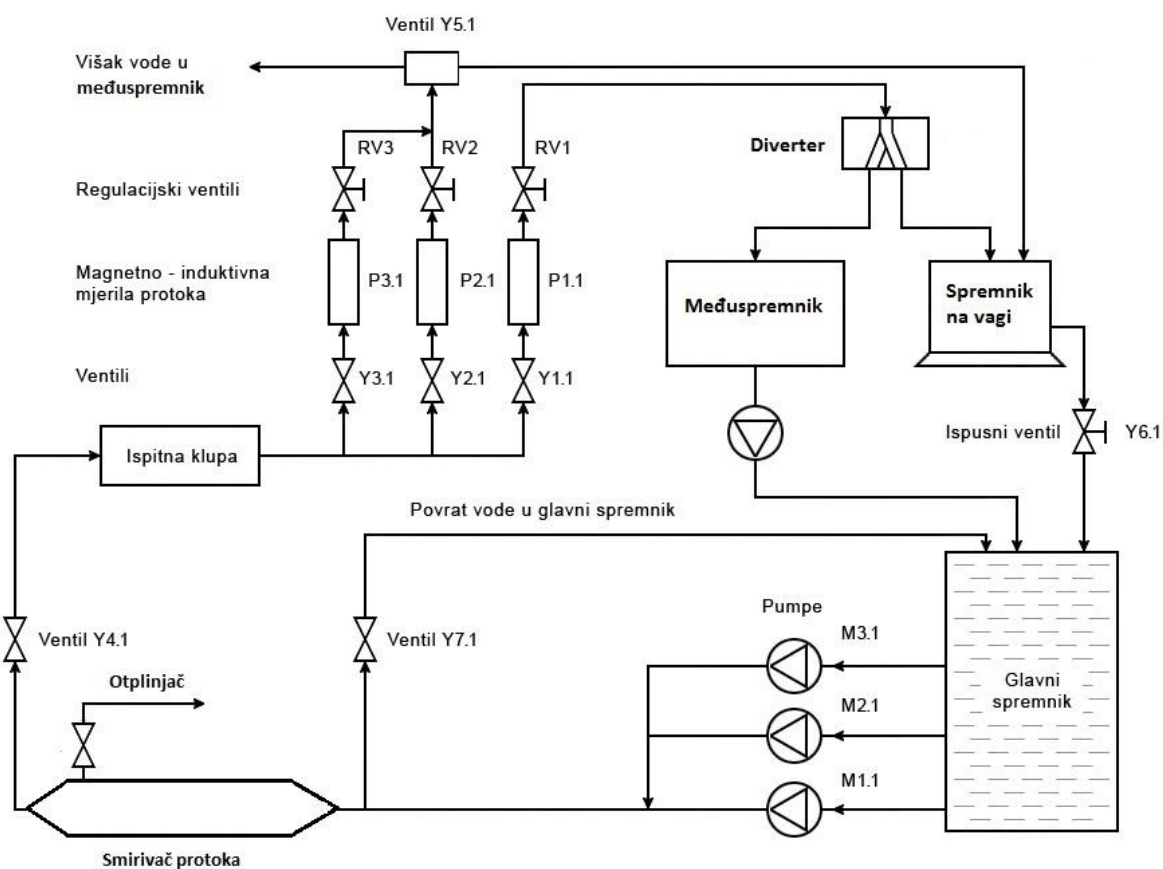
MERIS MP 203 nazivnog promjera DN25 za protoke od 0,9 do 9 m³/h;

MERIS MP 203 nazivnog promjera DN80 za protoke od 9 do 90 m³/h.

Instalirana vaga za mjerenje mase vode je proizvod METTLER - TOLEDO KE 1500, klase točnosti II, s razlučivošću od 100 grama. Masa vode na vagi koja se može mjeriti iznosi od 50 do 1500 kg. Na pripadajućoj ispitnoj klupi mogu se ispitivati mjerila protoka hladne i tople vode i mjerila toplinske energije nazivnih promjera od DN50 do DN100, pri čemu se istovremeno mogu ispitivati do tri mjerila za promjer DN50, do dva za DN65 i DN80 i jedno mjerilo za promjer DN100.

5.3. Opis mjerenja na mjernim linijama

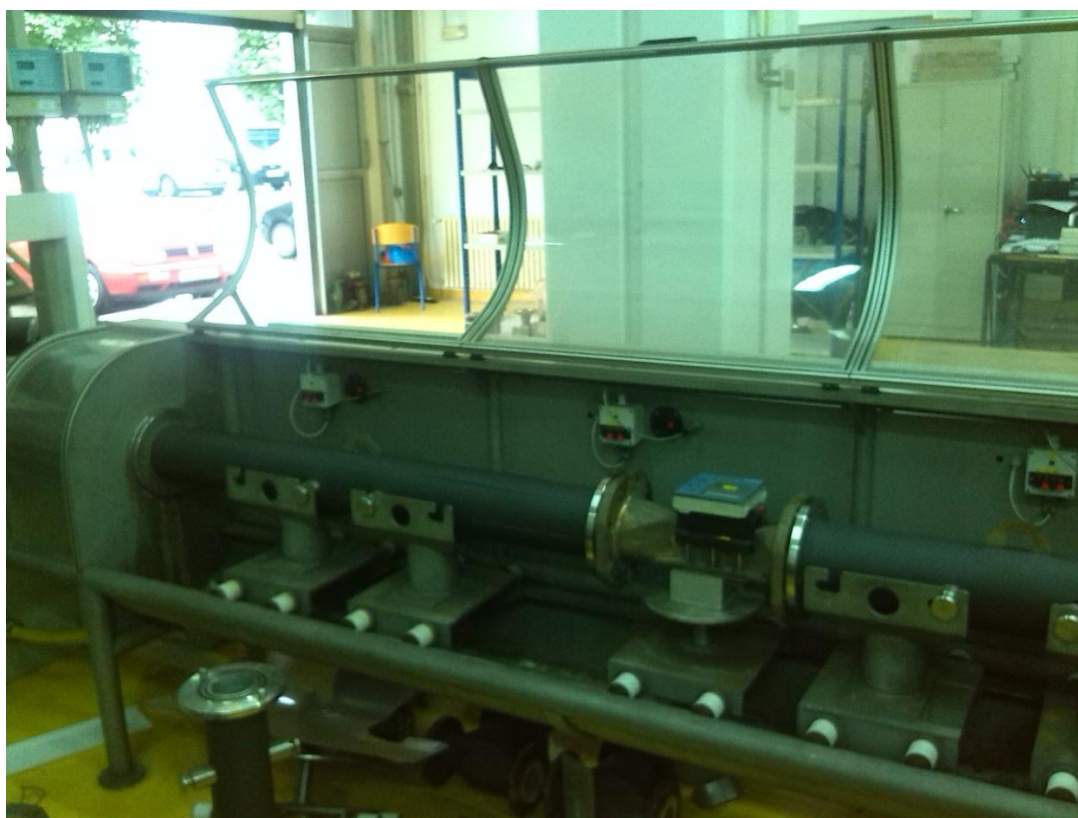
Među glavne dijelove mjerne linije ubrajaju se od glavni spremnik za pripremu vode i međuspremnik za prikupljanje vode, koji su zajednički za obje linije, tri pumpe, ispitna klupa, tri regulacijska ventila, tri magnetno - induktivna mjerila protoka, diverter, spremnik na vagi i vaga, koja je umjerena kao etalon za ispitivanje mjerila protoka gravimetrijskom metodom [Slika 7].



Slika 7. Shema mjerne linije G2T 90/50-100

Prilikom mjerenja voda se pumpa iz glavnog spremnika i kroz ispitnu klupu se putem regulacijskih ventila šalje se u spremnik na vagi. Nakon završetka mjerenja voda se iz spremnika na vagi vraća natrag u glavni spremnik.

Mjerna linija ima tri pumpe zbog mogućnosti odabira različitih protoka. Prilikom ispitivanja pojedina pumpa dobavlja odabrani protok kroz ispitnu klupu sa priključenim mjerilom protoka koje se ispituje. Ispitnu klupu [Slika 8] moguće je pomoću cijevi različitih dimenzija prilagoditi veličini i vrsti mjerila protoka koje se ispituje. Ispitna klupa ima zaštitni plastični pokrov koji se prilikom mjerenja spušta radi zaštite od mogućeg prskanja vode i radi osiguravanja što bolje temperaturne stabilnosti u slučaju umjeravanja mjerila protoka tople vode ili mjerila toplinske energije. Iz istog razloga dodatno su toplinski izolirane cijevi ispitne klupe i ostatka mjerne linije, te spremnik vode na vagi.



Slika 8. Dio ispitne klupe mjerne linije G2T 90/50-100 s priključenim mjerilom protoka

Ispitna klupa je dalje spojena na regulacijski dio mjerne linije koji se sastoji od tri grane cjevovoda s tri zaporna ventila (Y1.1, Y2.1 i Y3.1), tri magnetno - induktivna mjerila protoka [Slika 9] i tri regulacijska ventila (R1, R2 i R3). Zaporni ventili se otvaraju ili zatvaraju ovisno o odabranom protoku, jedan ventil je otvoren dok su druga dva zatvorena. Magnetno - induktivna mjerila i regulacijski ventili služe za podešavanje željenog iznosa protoka ovisno o mjerenju.



Slika 9. Dva magnetno - induktivna mjerila protoka mjerne linije G2T 90/50-100

Nakon regulacijskog dijela slijede diverter i spremnik na vagi [Slika 10]. Diverter služi za trenutnu promjenu smjera toka vode između spremnika na vagi i međuspremnika vode. Spremnik na vagi opremljen je ispusnim ventilom za ispuštanje vode iz spremnika nakon završetka mjerenja i sigurnosnim senzorima razine nivoa vode radi sprječavanja prelijevanja vode iz spremnika.



Slika 10. Spremnik na vagi mjerne linije G2T 90/50-100

Za ispitivanje pojedinih mjerila protoka prije početka mjerenja potrebno je mjerilo protoka spojiti na ispitnu klupu. U slučaju da se ispituje više mjerila protoka ona se na ispitnoj klupi spajaju u seriju. Mjerila protoka se učvršćuju na ispitnu klupu hidrauličkim mehanizmom, nakon toga cijela mjerna linija puni se vodom iz glavnog spremnika pri malom protoku radi odzračivanja linije i zagrijavanja sustava na ispitnu temperaturu. Prisutnost mjehurića zraka unutar mjerne linije moguće je provjeriti kroz poseban stakleni dio cijevi. Nakon završenog postupka punjenja mjerne linije vodom postupak mjerenja može započeti. Vrijednosti protoka namještaju se, prema karakteristikama pojedinog mjerila protoka koje se ispituje, putem programa na računalu, koji podešava otvorenost regulacijskih ventila. Sam postupak mjerenja može se provoditi za određeni željeni protok ili kao dio automatskog ciklusa sa tri protoka, koji se sastoji od nominalnog protoka mjerila, 10% nominalnog protoka i minimalnog protoka, koji iznosi 1% nominalnog protoka mjerila.

Nakon završetka mjerenja, voda se ispušta iz ispitne klupe, nakon čega se mogu odspojiti ispitivana mjerila protoka.

6. ULTRAZVUČNO MJERILO PROTOKA

Ultrazvučno mjerilo protoka na kojem su vršena ispitivanja tijekom izrade ovog rada je proizvod Ultrasonic flowmeter RV-100H proizvođača DaLian Zerogo Instruments iz Kine [Slika 11]. Mjerilo je primjenjivo za mjerenje protoka unutar čeličnih cijevi, cijevi od nehrđajućeg čelika, lijevanog čelika, PVC-a, polimernih materijala ojačanih vlaknima i cijevi od drugih materijala uniformne gustoće. Tekućine čiji se protok može mjeriti ovim mjerilom uključuju vodu, morsku vodu, otpadne vode, alkohol i razna ulja.



Slika 11. Ispitivano ultrazvučno mjerilo protoka [7]

Na stranici navedene karakteristike mjerila su sljedeće [8]:

Linearnost	0,5%
Točnost	$\pm 1\%$ pri brzinama $> 0,2$ m/s
Ponovljivost	0,2%
Vrijeme odziva	0-999 s, podesivo
Brzine protoka	$\pm 0,01$ do ± 32 m/s
Promjeri cijevi	20 - 6000 mm
Prikaz na zaslonu	trenutni volumni protok, brzina protoka, ukupni volumen, itd.

Senzori	M1 standardni model, 3 modela opcionalna
Dužina kabela	2x10 m, moguće 2x500 m
Napajanje	3 ugrađene AAA Ni-H baterije omogućuju više od 10 sati neprekidnog mjerenja, 100V-240V AC za punjač
Materijal kućišta	ABS
Veličina kućišta	220×92×32 mm
Težina	538g s baterijama

Ovo mjerilo protoka [Slika 12] dizajnirano je za primjenu kao prijenosno mjerilo jednostavno za korištenje. Na mjestu mjerenja postavlja se izvana na cijevi, a radi na principu metode mjerenja vremena prolaza. Volumni protok tekućine u cijevi mjeri se pomoću para ultrazvučnih primopredajnika. Pri tome cijev treba biti potpuno ispunjena tekućinom bez ili s vrlo malo mjehurića zraka.

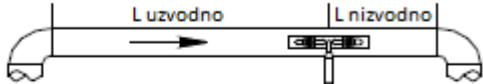
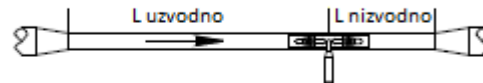
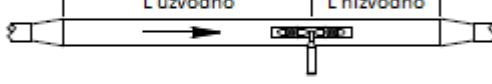
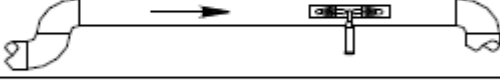
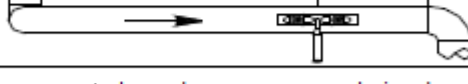
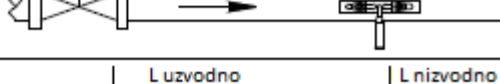
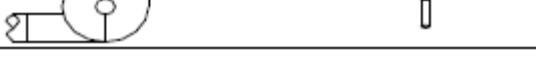


Slika 12. Ispitivano ultrazvučno mjerilo protoka priključeno na mjernoj liniji u laboratoriju

6.1. Preporuke za instalaciju ultrazvučnog mjerila protoka [7]

Instalacija ultrazvučnog mjerila protoka je jednostavna i ne zahtjeva posebne vještine ili alate. Prvi korak prije instaliranja je odabir optimalnog mjesta za postavljanje primopredajnika da bi rezultati mjerenja bili točni i pouzdani. Preporučljivo je osnovno znanje o ispitivanom cjevovodu.

Optimalno mjesto postavljanja bio bi dugačak ravan dio horizontalnog ili vertikalnog cjevovoda potpuno ispunjen tekućinom. Preporuka je da dužina ravne cijevi bude 15 puta veća od promjera cijevi (15D). Primopredajnici se postavljaju na udaljenosti najmanje 10 puta većoj od promjera (10D) od uzvodne promjene toka (npr. koljeno, suženje, proširenje cjevovoda), 5 puta većoj od promjera (5D) od nizvodne promjene i na udaljenosti od pumpe najmanje 30 puta većoj od promjera (30D) [Slika 13].

Konfiguracija cjevovoda i postavljanje primopredajnika		
	L uzvodno x promjer D	L nizvodno x promjer D
	10D	5D
	10D	5D
	10D	5D
	12D	5D
	20D	5D
	20D	5D
	30D	5D

Slika 13. Preporuke za mjesta postavljanja primopredajnika na cjevovode [9]

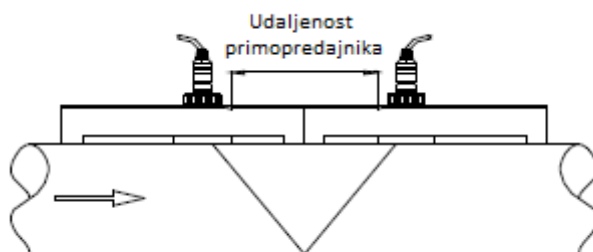
Temperatura stijenke cijevi na mjestu postavljana ne smije prelaziti preporučenu temperaturu upotrebe primopredajnika. Općenito, što je temperatura stijenke bliža sobnoj temperaturi to su bolji uvjeti za ispitivanje.

Ako je moguće potrebno je odabrati noviji dio ispitivanog cjevovoda. Stare cijevi mogu imati naslage ili koroziju, koje utječu na rezultate mjerenja. U slučaju ispitivanja protoka u starim cijevima preporuča se na naslage ili koroziju gledati kao na dio unutarnje obloge cijevi, npr. može se uvećati vrijednost debljine same cijevi ili se može dodati parametar debljine obloge.

Prilikom postavljanja primopredajnika potrebno ih je postaviti na točno određenu međusobnu udaljenost. Postoji više različitih načina ili metoda postavljanja primopredajnika s vanjske strane cijevi, a odabir ovisi o vrsti cijevi i vrsti tekućine čiji se volumni protok mjeri. Metode su sljedeće:

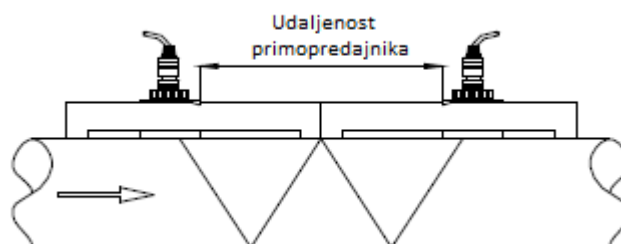
V-metoda je metoda postavljanja kod koje zvuk prolazi kroz cijev dva puta, naziva se i metoda postavljanja s refleksijom [

Slika 14]. Primopredajnici se postavljaju na istoj strani cijevi. Ovo je najčešće korištena metoda za povremena mjerenja za unutarnje promjere cijevi od 20 do 300 mm.



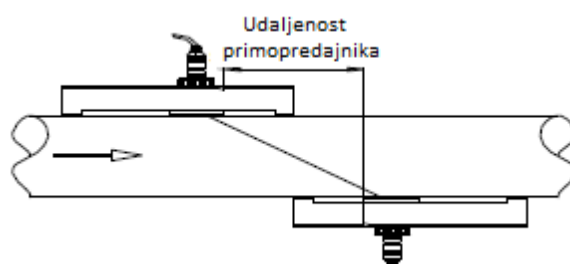
Slika 14. Prikaz V-metode postavljanja primopredajnika [9]

W-metoda je metoda postavljanja gdje zvuk prolazi kroz cijev četiri puta, s primopredajnicima na istoj strani cijevi [Slika 15]. Ova metoda obično se koristi kod plastičnih cijevi s unutarnjim promjerima od 10 do 100 mm, a može biti učinkovita i na manjim cijevima s naslagama unutar cijevi.



Slika 15. Prikaz W-metode postavljanja primopredajnika [9]

Z-metoda je metoda kod koje se primopredajnici postavljaju na suprotnim stranama cijevi i ultrazvučni valovi kroz cijev prolaze samo jedan put [Slika 16]. Ova metoda koristi se kod cijevi većih dimenzija, unutarnjih promjera od 100 do 500 mm. Budući da je prolaz signala direktan primjenom ove metode moguće je postići bolje rezultate nego primjenom V metode.



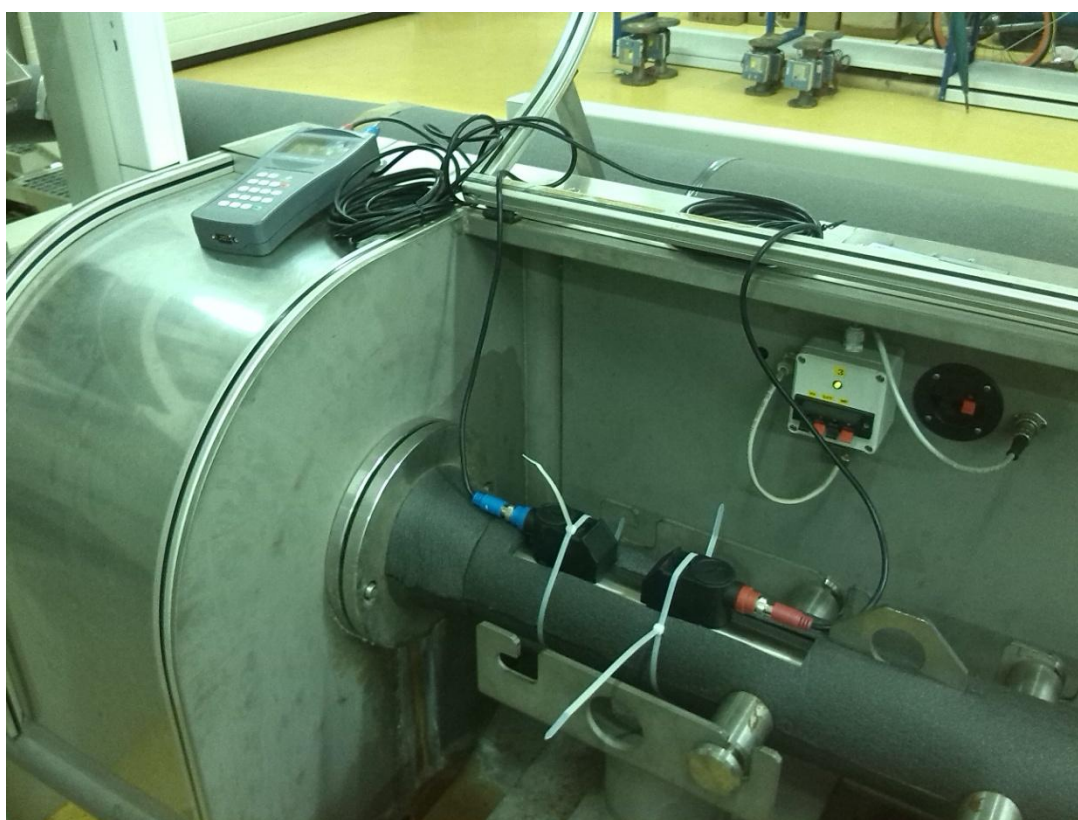
Slika 16. Prikaz Z-metode postavljanja primopredajnika [9]

Prije samog početka mjerenja potrebno je unijeti određene postavke mjerenja u programu ultrazvučnog mjerila protoka. Potrebno je:

1. Definirati vrijednosti veličine i debljine cijevi.
2. Definirati materijal cijevi. Za standardne materijale vrijednosti brzine zvuka su već programirane u programu mjerila protoka. Za nestandardne materijale cijevi potrebno je definirati i brzinu zvuka kroz materijal.
3. Definirati materijal unutarnje obloge cijevi, brzinu zvuka kroz materijal obloge i debljinu obloge, u slučaju da se ispituju vrijednosti protoka unutar obložene cijevi.
4. Definirati vrstu tekućine čiji protok se ispituje, za nestandardne tekućine potrebno je definirati i vrijednost brzine zvuka kroz tekućinu.
5. Definirati tip primopredajnika koji će biti korišteni tijekom ispitivanja.
6. Definirati metodu postavljanja primopredajnika (npr. V-metoda, Z-metoda).

7. Provjeriti iznos udaljenosti primopredajnika prikazan na zaslonu mjerila za instalaciju primopredajnika na cijev.

Prije samog postavljanja primopredajnika na cijev potrebno je, u slučaju da je cijev toplinski izolirana, ukloniti postojeću izolaciju s mjesta postavljanja, te taj dio cijevi očistiti od mogućih nečistoća ili hrđe, za bolje rezultate preporuča se ispolirati cijev brusnim papirom. Na tako pripremljeno mjesto, kao i na površine primopredajnika, nanosi se odgovarajuće sredstvo za poboljšavanje prolaza ultrazvuka kroz cijev, koje može biti gel, mast ili Vazelin. Primopredajnici se na cijev mogu pričvrstiti na razne načine, putem odgovarajućih šina, lanaca za postavljanje ili PVC vezica [Slika 17]. U nekim slučajevima primopredajnici imaju ugrađene magnete pa je moguć i takav način postavljanja na cijevi od magnetnih materijala. Nakon postavljanja između same površine cijevi i primopredajnika ne smije biti praznog prostora.



**Slika 17. Primjer postavljanja primopredajnika na cijev na mjernoj liniji
G2T 90/50-100**

7. PROVEDBA I REZULTATI MJERENJA

Svrha mjerenja bilo je ispitivanje karakteristika i točnosti prijenosnog ultrazvučnog mjerila protoka Ultrasonic flowmeter RV-100H. Ultrazvučno mjerilo protoka radi na principu metode vremena prolaza, a kupljeno je s namjenom za korištenje pri terenskim mjerenjima u industriji, točnije za mjerenje protoka fluida u izmjenjivačima topline.

7.1. Plan mjerenja

Mjerenja volumnog protoka vršena su na mjernoj liniji G2T 90/50-100 u Laboratoriju za procesna mjerenja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Za mjerenje je odabrana mjerna linija G2T 90/50-100, koja omogućava mjerenje protoka pri nazivnim promjerima od DN50 do DN100 jer se pri ispitivanju ultrazvučnog mjerila protoka planiralo koristiti primopredajnike tipa M2H, koji su kupljeni zajedno s mjerilom. Primopredajnici M2H namijenjeni su za srednje promjere cijevi od 50 do 100 mm promjera i pogodni za primjenu kod temperatura od 0 do 70°C [Slika 18].



Slika 18. Primopredajnici M2H korišteni pri mjerenju

Za ispitivanje na mjernoj liniji odlučilo se koristiti metodu letećeg starta zbog uočenog sporijeg odziva ultrazvučnog mjerila protoka tijekom preliminiranih mjerenja. Odlučeno je da će se ispitivanje izvršiti na jednom promjeru cijevi za tri različite proizvoljno odabrane vrijednosti

volumnog protoka od 30, 16 i 7 m³/h, odnosno nominalnog iznosa volumena od 500, 300 i 150 dm³ s tri ponovljena mjerenja za svaki pojedini protok.

7.2. Priprema i provedba mjerenja

Za mjerenja su se istovremeno koristile ultrazvučna i gravimetrijska metoda mjerenja, odnosno mjerenja izvršena gravimetrijskom metodom služila su kao provjera mjerenja izvršenih ultrazvučnom metodom. Teoretski magnetno - induktivna metoda mjerenja može isto služiti za provjeru ultrazvučne metode, ali magnetno - induktivna mjerila na mjernoj liniji G2T 90/50-100 nisu namijenjena za primjenu kao referenta mjerila već samo služe za postavljanje i regulaciju protoka.

Prije početka mjerenja ultrazvučnom metodom provedene su pripreme za mjerenje. Provjerena je napunjenost baterije uređaja, a zatim su na mjerilo protoka priključeni kablovi, pomoću kojih su na mjerilo priključeni primopredajnici. Izmjeren je promjer i debljina odabrane cijevi za mjerenja, te su izmjereni podaci uneseni u program mjerila protoka. U program su isto tako uneseni podaci o materijalu cijevi, vrsti tekućine čiji će se protok mjeriti, tip primopredajnika i metoda postavljanja primopredajnika. Na osnovu tih podataka u programu je izračunata međusobna udaljenost na koju je potrebno postaviti primopredajnike na cijev.

Na površinu primopredajnika i površinu cijevi nanesen je gel za poboljšavanje prostiranja ultrazvuka kroz cijev, nakon čega su primopredajnici učvršćeni na cijev pomoću PVC vezica na odgovarajuću međusobnu udaljenost, pri čemu je odabrana V-metoda postavljanja primopredajnika.

Prije početka svakog mjerenja puštena je voda kroz ultrazvučno mjerilo i ispitnu liniju prema međuspremniku vode, zatim bi se putem regulacijskog ventila i magnetno - induktivnog mjerila namjestila željena nominalna vrijednost volumnog protoka. Vrijednost iznosa mase na vagi resetirala bi se na nulu, kao i iznos kumulativnog brojača protoka na ultrazvučnom mjerilu. Mjerenje je započinjalo prekretnjem toka vode putem divertera prema spremniku na vagi. Vrijeme mjerenja bi počelo teći. U istom trenutku ručno bi se pokrenuo i kumulativni brojač na ultrazvučnom mjerilu. Nakon što je određen iznos mase vode protekao kroz ispitnu liniju i ultrazvučno mjerilo, mjerenje se zaustavljalo, vrijeme je prestalo teći, a kumulativni brojač na ultrazvučnom mjerilu bi se isto zaustavio. Nakon završetka svakog mjerenja pomoću

kumulativnog brojača očitavala se vrijednost ukupne količine volumena vode koja je protekla kroz mjerilo V_{uz} . Iz programa na računalu za praćenje mjerenja gravimetrijskom metodom očitane su vrijednosti prikupljene mase vode u spremniku na vagi m_{vaga} , koja se uz izračunatu gustoću za očitane vrijednosti temperature i tlaka vode iz istog programa, preračunavala u volumen vode prikupljen u spremniku na vagi V_{vaga} . Iz očitane vrijednosti količine volumena vode kroz ultrazvučno mjerilo i izračunate količine volumena vode na vagi uz poznato vrijeme mjerenja t , izračunate su još i vrijednosti volumnog protoka za ultrazvučno mjerilo $q_{v,uz}$ i gravimetrijsku metodu $q_{v,vaga}$.

7.3. Rezultati mjerenja

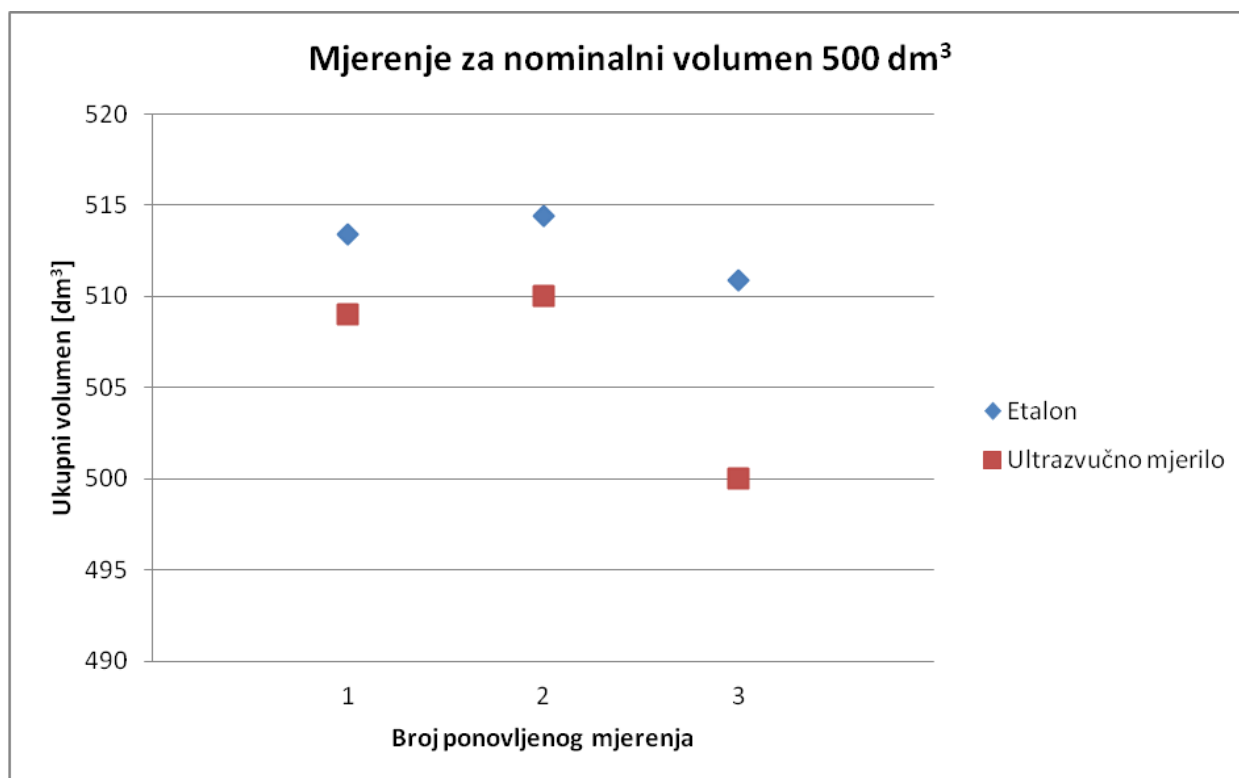
Podaci uz ispitivanje uneseni u program ultrazvučnog mjerila protoka bili su sljedeći:

Vanjski promjer cijevi:	104 mm
Debljina cijevi:	2 mm
Materijal cijevi:	Nehrđajući čelik
Vrsta tekućine:	Voda
Odabrani tip sonde:	8 (odgovara tipu M2H)
Metoda montaže sonde:	V-metoda
Korekcijski faktor:	0,89

Tablica 1 prikazuje rezultate mjerenja za nominalni volumen 500 dm^3 pri nominalnom volumnom protoku od $30 \text{ m}^3/\text{h}$. Svako od tri ponovljena mjerenja trajalo je 58 sekundi.

Tablica 1. Rezultati mjerenja za nominalni volumen 500 dm^3

Broj mjerenja n	Temperatura ϑ	Tlak p	Gustoća ρ	Etalon			Ultrazvučno mjerilo	
				Masa m_{vaga}	Volumen V_{vaga}	Volumni protok $q_{v,vaga}$	Volumen V_{uz}	Volumni protok $q_{v,uz}$
[-]	[°C]	[bar]	[kg/m ³]	[kg]	[dm ³]	[m ³ /h]	[dm ³]	[m ³ /h]
1.	49,2	2,4	988,47	507,5	513,43	31,87	509,00	31,59
2.	49,2	2,4	988,47	508,5	514,43	31,93	510,00	31,66
3.	49,1	2,3	988,51	505,0	510,87	31,71	500,00	31,03



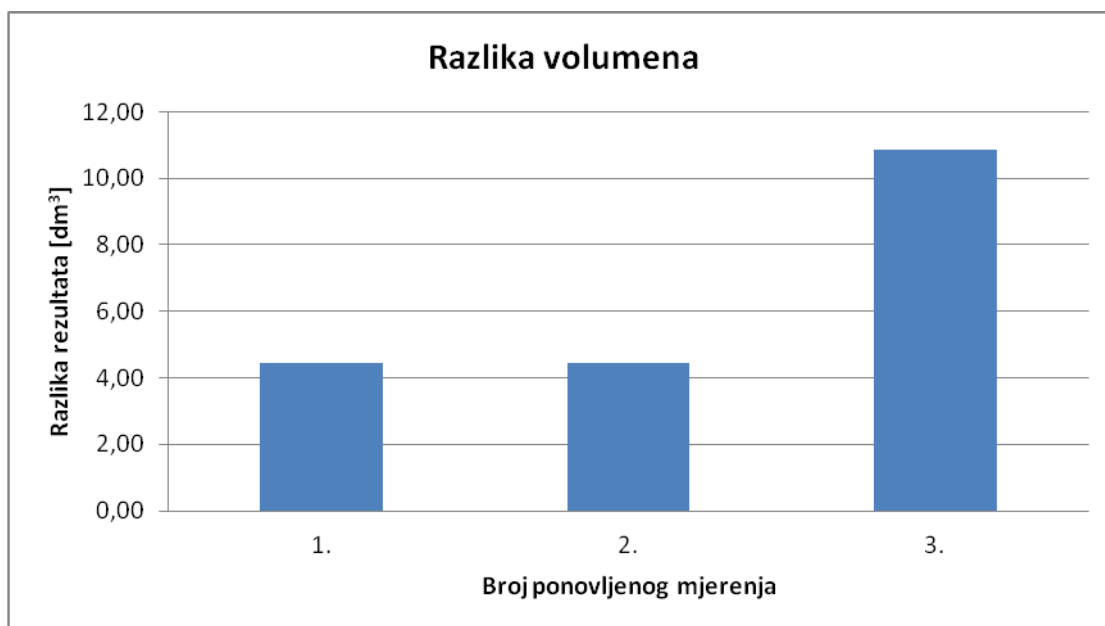
Graf 1. Prikaz rezultata mjerenja za nominalni volumen 500 dm³

Iz grafičkog prikaza rezultata mjerenja za nominalni volumen 500 dm³ vidljivo je postojanje odstupanja rezultata dobivenih mjerenjem ultrazvučnom metodom i rezultata dobivenih mjerenjem gravimetrijskom metodom, pri čemu su rezultati ultrazvučne metode po iznosima manji od rezultata gravimetrijske metode, a najveće odstupanje iznosa rezultata vidljivo je pri trećem ponovljenom mjerenju.

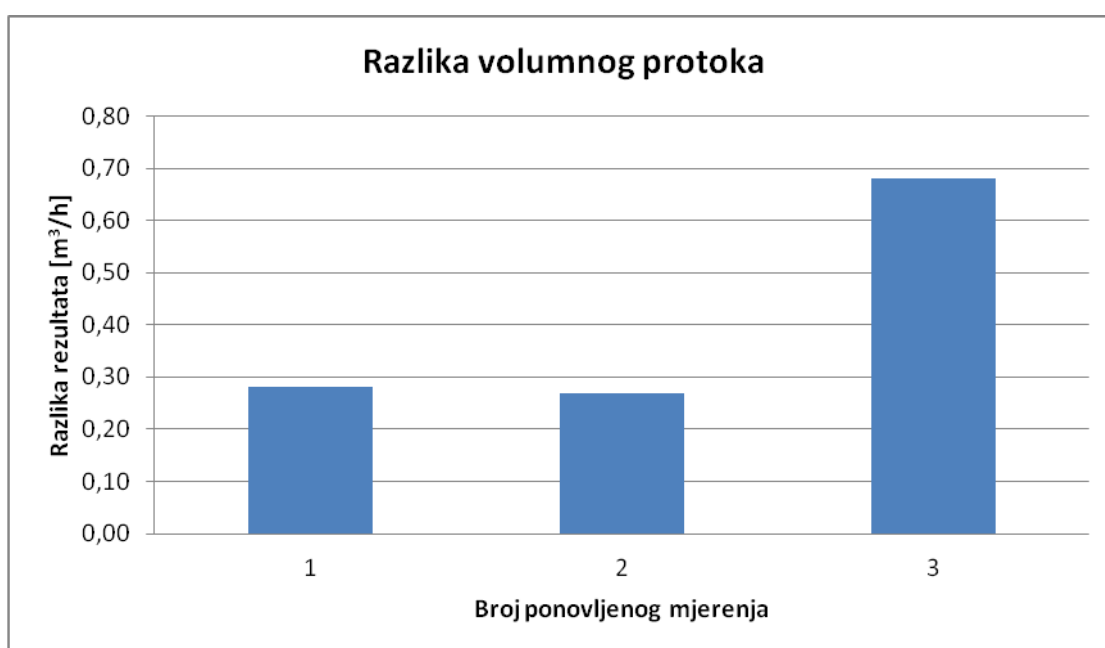
Tablica 2 prikazuje izračunate razlike mjerenja za nominalni volumen 500 dm³ za očitane vrijednosti ukupnog volumena i volumnog protoka, koje su zatim prikazane i grafički.

Tablica 2. Razlike mjerenja za nominalni volumen 500 dm³

Broj mjerenja	Razlike rezultata mjerenja			
	Razlika volumena	Razlika volumena u postotcima	Razlika volumnog protoka	Razlika volumnog protoka u postotcima
[-]	[dm ³]	[%]	[m ³ /h]	[%]
1.	4,43	0,86	0,28	0,88
2.	4,43	0,86	0,27	0,85
3.	10,87	2,13	0,68	2,14
Srednja razlika	6,58		0,41	



Graf 2. Prikaz razlika očitanih vrijednosti volumena za nominalni volumen 500 dm³



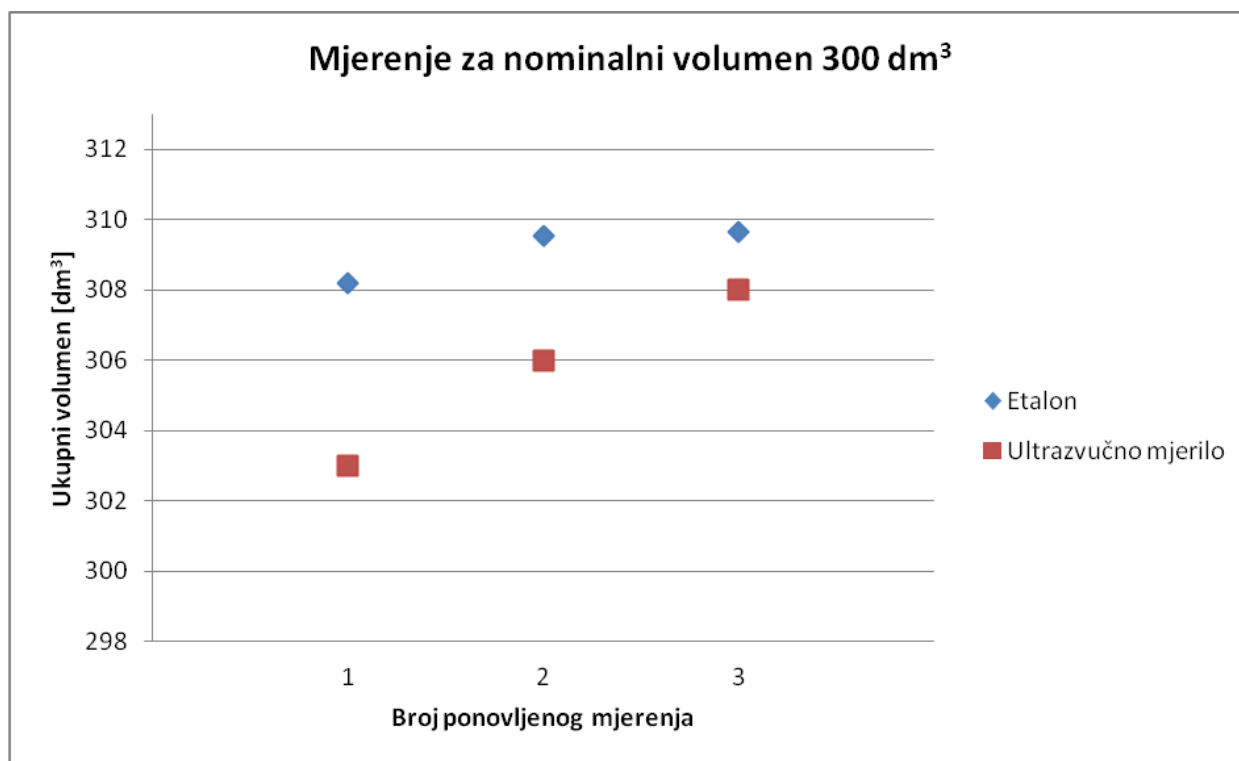
Graf 3. Prikaz razlika očitanih vrijednosti volumnog protoka za nominalni volumen 500 dm³

Iz grafičkog prikaza razlika rezultata između dvije metode mjerenja za nominalni volumen 500 dm³ vidljivo je da su razlike pri prva dva ponovljena mjerenja gotovo jednake po iznosima, dok su razlike za treće ponovljeno mjerenje približno dvostruko veće.

Tablica 3 prikazuje rezultate mjerenja za nominalni volumen 300 dm^3 pri nominalnom volumnom protoku od $16 \text{ m}^3/\text{h}$. Svako od tri ponovljena mjerenja trajalo je 67 sekundi.

Tablica 3. Rezultati mjerenja za nominalni volumen 300 dm^3

Broj mjerenja n	Temperatura ϑ	Tlak p	Gustoća ρ	Etalon			Ultrazvučno mjerilo	
				Masa m_{vaga}	Volumen V_{vaga}	Volumni protok $q_{\text{v,vaga}}$	Volumen V_{uz}	Volumni protok $q_{\text{v,uz}}$
[-]	[°C]	[bar]	[kg/m ³]	[kg]	[dm ³]	[m ³ /h]	[dm ³]	[m ³ /h]
1.	49,5	2,8	988,35	305,6	309,20	16,61	304,00	16,33
2.	49,8	2,8	988,22	305,9	309,55	16,63	306,00	16,44
3.	49,9	2,8	988,17	306,0	309,66	16,64	308,00	16,55



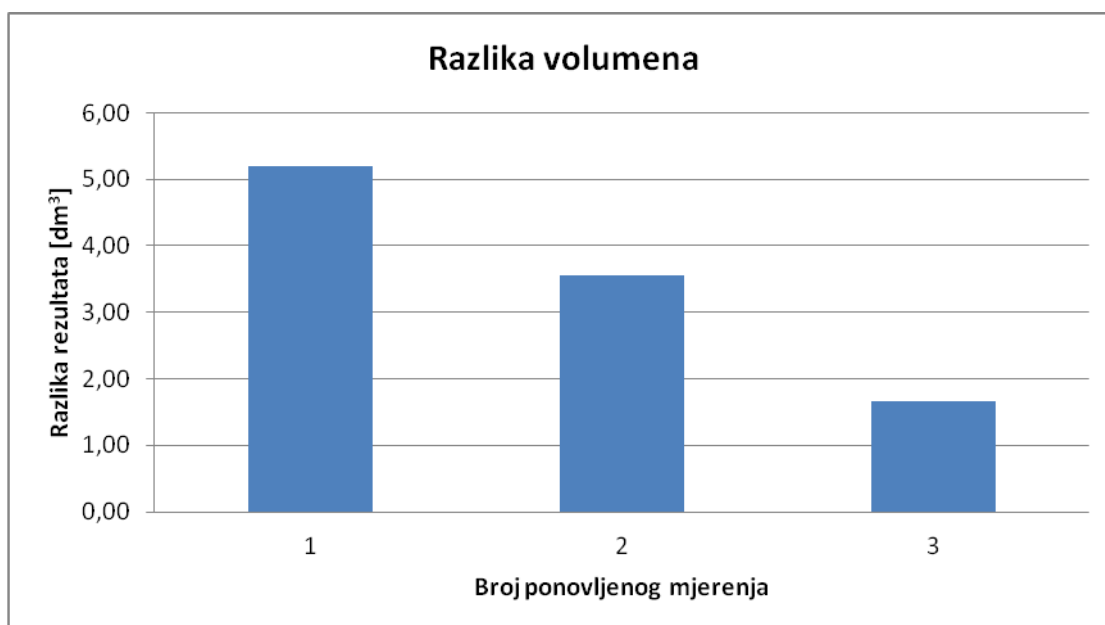
Graf 4. Prikaz rezultata mjerenja za nominalni volumen 300 dm^3

Iz grafičkog prikaza rezultata mjerenja za nominalni volumen 300 dm^3 vidljivo je da su odstupanja rezultata ultrazvučne metode i rezultata gravimetrijske metode najveća pri prvom ponovljenom mjerenju, a najmanja pri trećem ponovljenom mjerenju, pri čemu su rezultati ultrazvučne metode i dalje po iznosima manji od rezultata gravimetrijske metode.

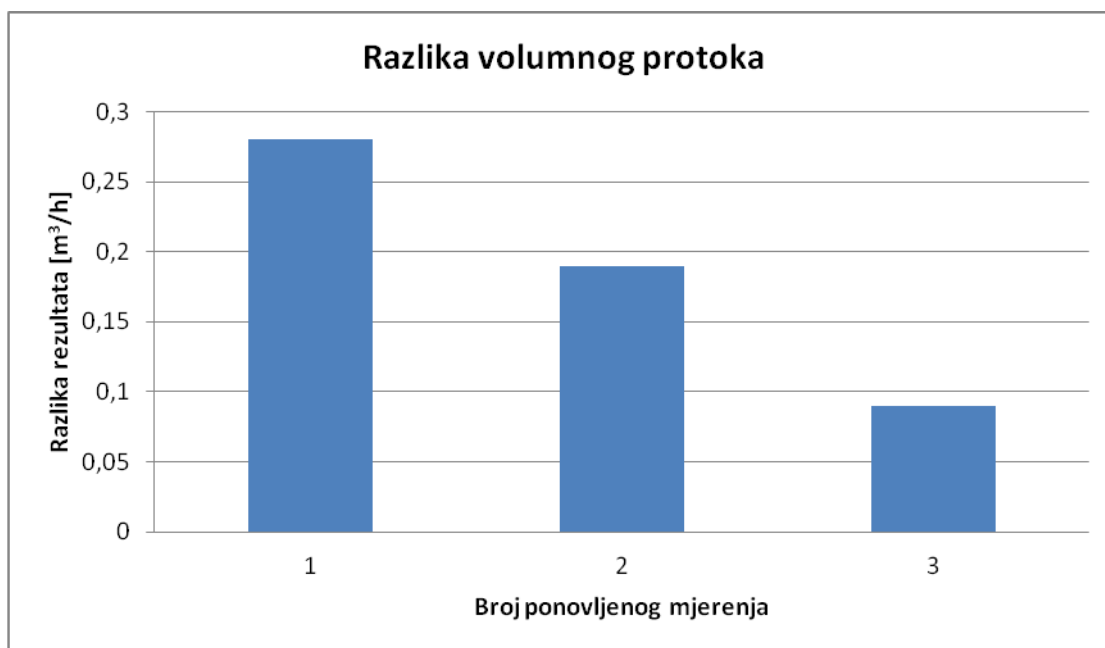
Tablica 4 prikazuje izračunate razlike mjerenja za nominalni volumen 300 dm^3 za očitane vrijednosti ukupnog volumena i volumnog protoka, koje su zatim prikazane i grafički.

Tablica 4. Razlike mjerenja za nominalni volumen 300 dm^3

Broj mjerenja	Razlika rezultata			
	Razlika volumena	Razlika volumena u postotcima	Razlika volumnog protoka	Razlika volumnog protoka u postotcima
[-]	$[\text{dm}^3]$	[%]	$[\text{m}^3/\text{h}]$	[%]
1.	5,20	1,68	0,28	1,69
2.	3,55	1,15	0,19	1,14
3.	1,66	0,54	0,09	0,54
Srednja razlika	3,47		0,19	



Graf 5. Prikaz razlika očitanih vrijednosti volumena za nominalni volumen 300 dm^3

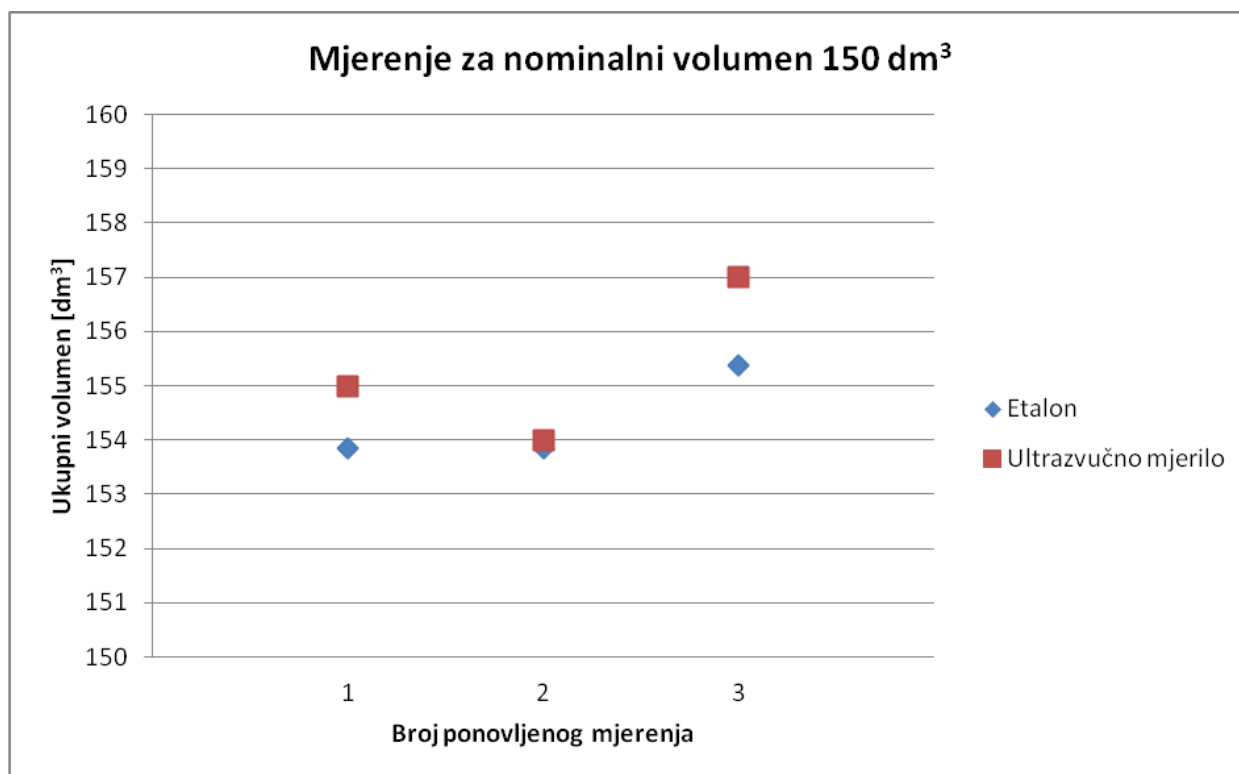


Graf 6. Prikaz razlika očitanih vrijednosti volumnog protoka za nominalni volumen 300 dm³

Tablica 5 prikazuje rezultate mjerenja za nominalni volumen od 150 dm³ pri nominalnom volumnom protoku 7 m³/h. Svako od tri ponovljena mjerenja trajalo je 78 sekundi.

Tablica 5. Rezultati mjerenja za nominalni volumen 150 dm³

				Etalon			Ultrazvučno mjerilo	
Broj mjerenja n	Temperatura θ	Tlak p	Gustoća ρ	Masa m _{vaga}	Volumen V _{vaga}	Volumni protok q _{v,vaga}	Volumen V _{uz}	Volumni protok q _{v,uz}
[-]	[°C]	[bar]	[kg/m ³]	[kg]	[dm ³]	[m ³ /h]	[dm ³]	[m ³ /h]
1.	50,3	1,9	987,95	152,0	153,85	7,10	155,00	7,15
2.	50,3	1,9	987,95	152,0	153,85	7,10	154,00	7,11
3.	50,3	1,9	987,95	152,5	154,36	7,12	156,00	7,20



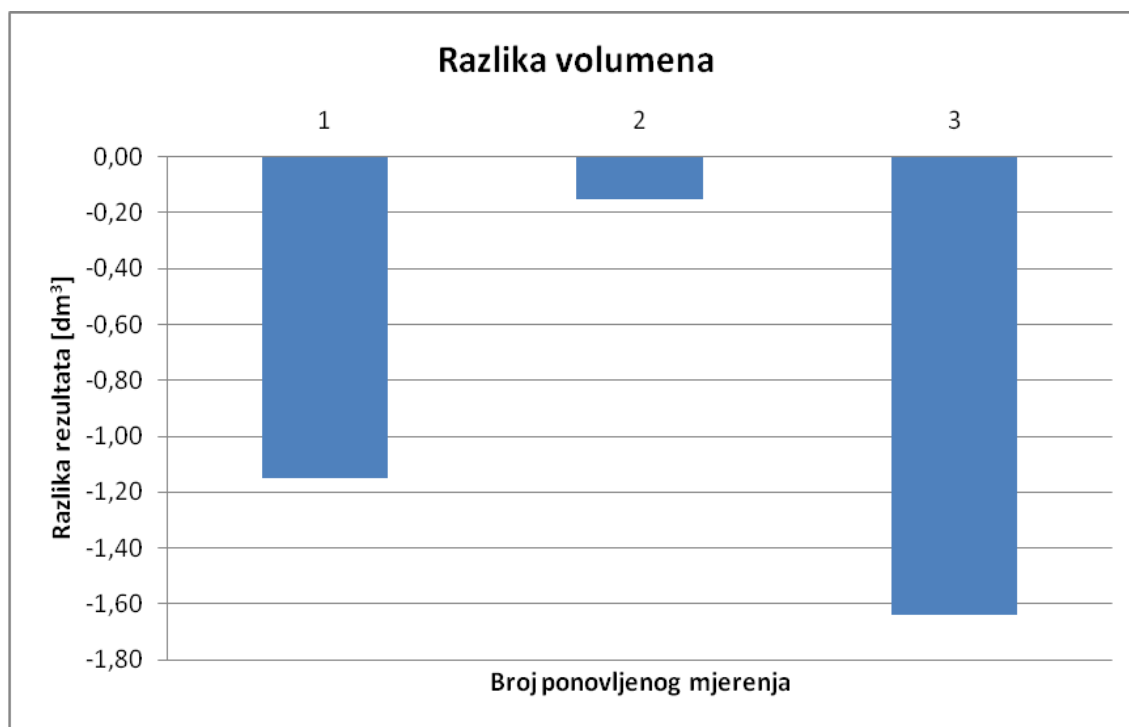
Graf 7. Prikaz rezultata mjerenja za nominalni volumen 150 dm³

Iz grafičkog prikaza rezultata mjerenja za nominalni volumen 150 dm³ vidljivo je da su, za razliku od rezultata prethodna dva mjerenja, rezultati dobiveni ultrazvučnom metodom većih iznosa od rezultata dobivenih gravimetrijskom metodom, pri čemu su rezultati drugog ponovljenog mjerenja relativno bliska po iznosu, dok je najveće odstupanje rezultata pri trećem ponovljenom mjerenju.

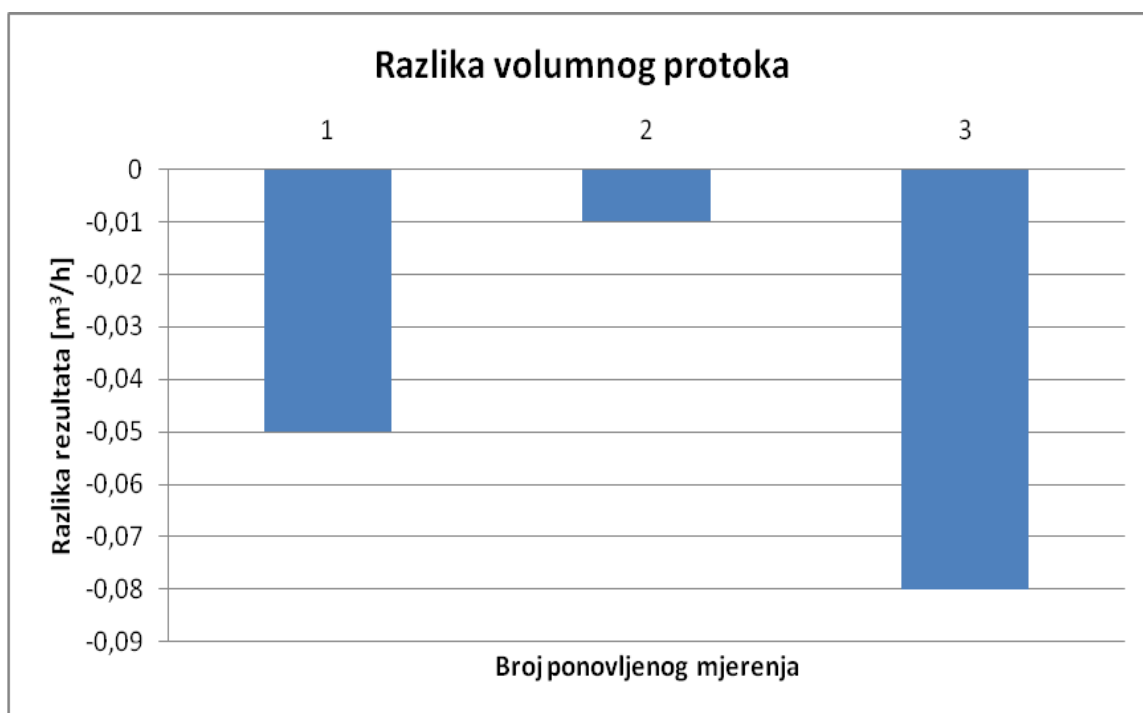
Tablica 6 prikazuje izračunate razlike mjerenja za nominalni volumen 150 dm³ za očitane vrijednosti ukupnog volumena i volumnog protoka.

Tablica 6. Razlike mjerenja za nominalni volumen 150 dm³

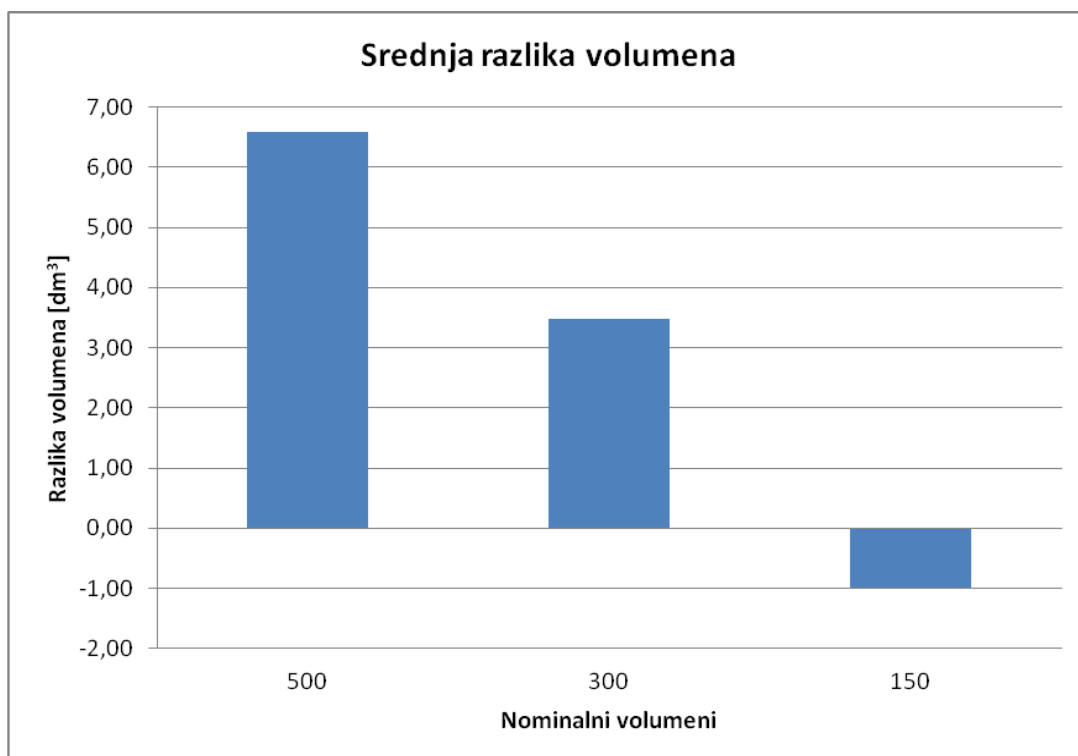
Broj mjerenja	Razlika rezultata			
	Razlika volumena	Razlika volumena u postotcima	Razlika volumnog protoka	Razlika volumnog protoka u postotcima
[-]	[dm ³]	[%]	[m ³ /h]	[%]
1.	-1,15	-0,75	-0,05	-0,70
2.	-0,15	-0,10	-0,01	-0,14
3.	-1,64	-1,06	-0,08	-1,12
Srednja razlika	-0,98		-0,05	



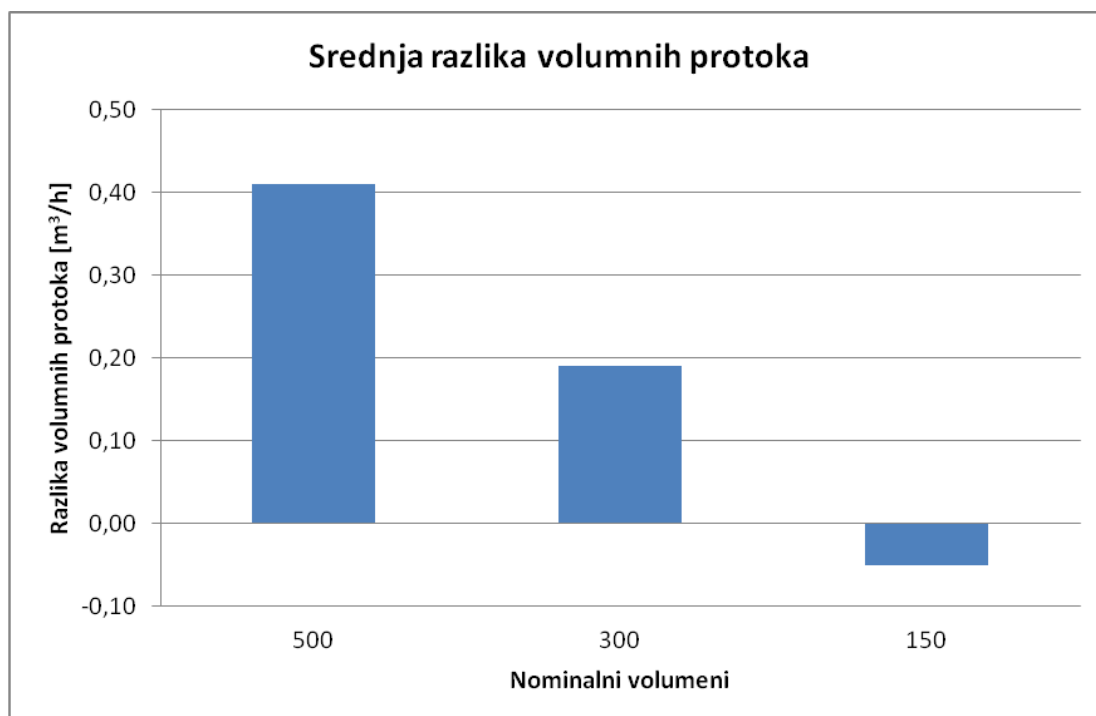
Graf 8. Prikaz razlika očitanih vrijednosti volumena za nominalni volumen 150 dm³



Graf 9. Prikaz razlika očitanih vrijednosti volumnog protoka za nominalni volumen 150 dm³



Graf 10. Srednje razlike očitanih vrijednosti volumena za tri nominalna volumena



Graf 11. Srednje razlike očitanih vrijednosti volumnog protoka za tri nominalna volumena

8. MJERNA NESIGURNOST

Svako mjerenje podložno je određenoj razini nesigurnosti. Rezultat mjerenja nije potpun ako uz njega nije izražena i nesigurnost mjerenja. Mjerna nesigurnost daje nam uvid u kvalitetu provedenog mjerenja i izražava sumnju s kojom se mogu koristiti rezultati mjerenja. Za procjenu mjerne nesigurnosti potrebno je definirati interval i razinu povjerenja da se rezultat nalazi unutar definiranog intervala.

Izračun mjerne nesigurnosti uključuje definiranje izvora mjerne nesigurnosti, procjenu mjerne nesigurnosti za svaki od definiranih izvora i izračun kombinirane mjerne nesigurnosti svih izvora. Izvori mjerne nesigurnosti mogu biti mjerni instrumenti, sam predmet mjerenja, odabrana metoda mjerenja, uvjeti okoline u kojoj se vrši mjerenje, osobe koje vrše mjerenje i drugi. Za određivanje mjerne nesigurnosti izvora mogu se koristiti dvije metode, metoda procjene mjerne nesigurnosti tipa A i metoda procjene mjerne nesigurnosti tipa B. Nakon izvršenih procjena mjerne nesigurnosti svi podaci se svode na istu razinu pouzdanosti odnosno na standardnu nesigurnost mjerenja. Tek nakon određivanja kombinirane mjerne nesigurnosti mjerenja mogu se donositi zaključci da li je mjerenje zadovoljilo svoju svrhu.

8.1. Metoda procjene mjerne nesigurnosti tipa A

Metoda procjene mjerne nesigurnosti tipa A koristi statističku analizu, ponavljanjem mjerenja i izračunom standardnog odstupanja rezultata tih ponovljenih mjerenja. U slučaju da za neko mjerenje nema ponovljenih mjerenja metoda procjene tipa A ne može se koristiti za određivanje mjerne nesigurnosti. Prilikom ponovljenih mjerenja razlikuju se očitavanja na mjernom uređaju, zbog čega je važno izračunavanje srednje vrijednosti, odnosno aritmetičke sredine mjerenja.

Aritmetička sredina ili srednja vrijednost x_m izračunava se pomoću jednadžbe (15):

$$x_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (15)$$

Gdje je:

x_i - vrijednost pojedinog mjerenja

n - broj ponovljenih mjerenja

Devijacija ili odstupanje pojedinih očitavanja od aritmetičke vrijednosti d_i izračunava se prema jednadžbi (16):

$$d_i = x_i - x_m \quad (16)$$

Prosječna devijacija ili prosječno odstupanje \bar{d} izračunava se kao zbroj svih odstupanja pojedinih očitavanja od aritmetičke sredine, pri čemu je njezin iznos uvijek jednak nuli prema (17):

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_m) = 0 \quad (17)$$

Standardna devijacija ili eksperimentalno standardno odstupanje $s(x_i)$ izračunava se prema (18):

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n d_i^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2} \quad (18)$$

Standardna devijacija srednje vrijednosti ili eksperimentalno standardno odstupanje $s(\bar{x}_i)$ izračunava se pomoću jednadžbe (19):

$$s(\bar{x}_i) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} \quad (19)$$

Standardna mjerna nesigurnost metodom procjene tipa A izražava se pomoću izraza za standardnu devijaciju srednje vrijednosti prema (20):

$$u_A(x_i) = s(\bar{x}_i) \quad (20)$$

8.2. Metoda procjene mjerne nesigurnosti tipa B

Metoda procjene mjerne nesigurnosti tipa B koristi druge dostupne izvore podataka o mjerenju za procjenu mjerne nesigurnosti. To mogu biti prethodni mjerni podaci, umjernice, specifikacije proizvođača, priručnici, iskustvo ili procjena o korištenju mjerila.

Standardna mjerna nesigurnost metodom procjene tipa B mora biti znatno manja od granične pogreške mjernog uređaja a :

$$u_B(x_i) \ll a \quad (21)$$

Ako je deklarirana maksimalna greška mjernog instrumenta $\pm a$ bez podataka o distribuciji mjerne vrijednosti unutar sigurnih granica, pretpostavlja se jednaka vjerojatnost pojavljivanja izmjerene veličine unutar $\pm a$, odnosno pravokutna razdioba.

Standardna mjerna nesigurnost metodom procjene tipa B jednaka je standardnoj devijaciji izmjerene veličine $s(x_i)$ prema jednadžbi (22):

$$u_B(x_i) = s(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (22)$$

8.3. Procjena kombinirane mjerne nesigurnosti

Fizikalna veličina kojoj je potrebno odrediti vrijednost često se ne može mjeriti, pa se njezina vrijednost određuje na posredan način mjerenjem vrijednosti drugih fizikalnih veličina o kojima ona ovisi. Na taj način procijenjena vrijednost mjerene fizikalne veličine y izračunava kao funkcija fizikalnih veličina x_i se prema izrazu:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (23)$$

Gdje su:

x_i - srednje vrijednosti mjerenja pojedinih veličina o kojima ovisi veličina y

Svaka od vrijednosti x_i u jednadžbi (23) ima svoju standardnu mjernu nesigurnost $u(x_i)$.

Kombinirana mjerna nesigurnost rezultata mjerenja $u_c(y)$ aproksimira se izrazom prema (24):

$$u_c(y) = \sqrt{u_A(x)^2 + u_B(x)^2} \quad (24)$$

Proširena mjerna nesigurnost izračunava se množenjem kombinirane mjerne nesigurnosti s faktorom prekrivanja k , koji je najčešće 2, što odgovara razini vjerojatnosti od 95% prema (25):

$$U(y) = 2 \cdot u_c(y) \quad (25)$$

Rezultat mjerenja se ispravno izražava se na sljedeći način:

$$y \pm U(y) = y \pm k u_c(y) \quad (26)$$

8.4. Mjerna nesigurnost rezultata kod gravimetrijske i ultrazvučne metode mjerenja

8.4.1. Procjena mjerene nesigurnosti tipa A

Prema prethodnih izrazima za metodu procjene mjerne nesigurnosti tipa A prvo se za rezultate mjerenja gravimetrijskom metodom izračunava aritmetička sredina \bar{x} i standardno odstupanje $s(x_i)$.

Za rezultate mjerenja nominalnog volumena 500 dm^3 gravimetrijskom metodom:

Aritmetička sredina \bar{x}_{G1} :

$$\bar{x}_{G1} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{3} \cdot (513,43 + 514,43 + 510,87) = 512,91 \text{ dm}^3$$

Standardna devijacija $s(x_{G1})$:

$$s(x_{G1}) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n d_i^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_{G1})^2} = 1,84 \text{ dm}^3$$

Standardna devijacija srednje vrijednosti $s(\bar{x}_{G1})$:

$$s(\bar{x}_{G1}) = \frac{s(x_{G1})}{\sqrt{n}} = 1,06 \text{ dm}^3$$

Standardna mjerna nesigurnost metodom procjene tipa A $u_A(x_{G1})$:

$$u_A(x_{G1}) = s(\bar{x}_{G1}) = 1,06 \text{ dm}^3$$

Za rezultate mjerenja nominalnog volumena 300 dm^3 gravimetrijskom metodom:

Aritmetička sredina \bar{x}_{G2} :

$$\bar{x}_{G2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{3} \cdot (309,20 + 309,55 + 309,66) = 309,47 \text{ dm}^3$$

Standardna devijacija $s(x_{G2})$:

$$s(x_{G2}) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n d_i^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_{G2})^2} = 0,24 \text{ dm}^3$$

Standardna devijacija srednje vrijednosti $s(\bar{x}_{G2})$:

$$s(\bar{x}_{G2}) = \frac{s(x_{G2})}{\sqrt{n}} = 0,14 \text{ dm}^3$$

Standardna mjerna nesigurnost metodom procjene tipa A $u_A(x_{G2})$:

$$u_A(x_{G2}) = s(\bar{x}_{G2}) = 0,14 \text{ dm}^3$$

Za rezultate mjerenja nominalnog volumena 150 dm^3 gravimetrijskom metodom:

Aritmetička sredina \bar{x}_{G3} :

$$\bar{x}_{G3} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{3} \cdot (153,85 + 153,85 + 154,36) = 154,02 \text{ dm}^3$$

Standardna devijacija $s(x_{G3})$:

$$s(x_{G3}) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n d_i^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_{G3})^2} = 0,29 \text{ dm}^3$$

Standardna devijacija srednje vrijednosti $s(\bar{x}_{G3})$:

$$s(\bar{x}_{G3}) = \frac{s(x_{G3})}{\sqrt{n}} = 0,17 \text{ dm}^3$$

Standardna mjerna nesigurnost metodom procjene tipa A $u_A(x_{G3})$:

$$u_A(x_{G3}) = s(\bar{x}_{G3}) = 0,17 \text{ dm}^3$$

Isti postupak računanja ponavlja se za rezultate mjerenja volumnog protoka ultrazvučnom metodom.

Za izračunate rezultate mjerenja nominalnog volumena 500 dm^3 ultrazvučnom metodom:

Aritmetička sredina \bar{x}_{U1} :

$$\bar{x}_{U1} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{3} \cdot (509,00 + 510,00 + 500,00) = 506,33 \text{ dm}^3$$

Standardna devijacija $s(x_{U1})$:

$$s(x_{U1}) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n d_i^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_{U1})^2} = 5,51 \text{ dm}^3$$

Standardna devijacija srednje vrijednosti $s(\bar{x}_{U1})$:

$$s(\bar{x}_{U1}) = \frac{s(x_{U1})}{\sqrt{n}} = 3,18 \text{ dm}^3$$

Standardna mjerna nesigurnost metodom procjene tipa A $u_A(x_{U1})$:

$$u_A(x_{U1}) = s(\bar{x}_{U1}) = 3,18 \text{ dm}^3$$

Za izračunate rezultate mjerenja nominalnog volumena 300 dm^3 ultrazvučnom metodom:

Aritmetička sredina \bar{x}_{U2} :

$$\bar{x}_{U2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{3} \cdot (304,00 + 306,00 + 308,00) = 306,00 \text{ dm}^3$$

Standardna devijacija $s(x_{U2})$:

$$s(x_{U2}) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n d_i^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_{U2})^2} = 2,00 \text{ dm}^3$$

Standardna devijacija srednje vrijednosti $s(\bar{x}_{U2})$:

$$s(\bar{x}_{U2}) = \frac{s(x_{U2})}{\sqrt{n}} = 1,15 \text{ dm}^3$$

Standardna mjerna nesigurnost metodom procjene tipa A $u_A(x_{U2})$:

$$u_A(x_{U2}) = s(\bar{x}_{U2}) = 1,15 \text{ dm}^3$$

Za izračunate rezultate mjerenja nominalnog volumena 150 dm^3 ultrazvučnom metodom:

Aritmetička sredina \bar{x}_{U3} :

$$\bar{x}_{U3} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{3} \cdot (155,00 + 154,00 + 156,00) = 155,00 \text{ dm}^3$$

Standardna devijacija $s(x_{U3})$:

$$s(x_{U3}) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n d_i^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_{U3})^2} = 1,00 \text{ dm}^3$$

Standardna devijacija srednje vrijednosti $s(\bar{x}_{U3})$:

$$s(\bar{x}_{U3}) = \frac{s(x_{U3})}{\sqrt{n}} = 0,58 \text{ m}^3$$

Standardna mjerna nesigurnost metodom procjene tipa A $u_A(x_{U3})$:

$$u_A(x_{U3}) = s(\bar{x}_{U3}) = 0,58 \text{ dm}^3$$

8.4.2. Procjena mjerene nesigurnosti tipa B

Nakon procjene mjerne nesigurnosti tipa A potrebno je izvršiti procjenu mjerne nesigurnosti tipa B. Prvo se obrađuju rezultati za gravimetrijsku metodu mjerenja za koju su iz umjernica prepisane sljedeće vrijednosti standardne mjerne nesigurnosti metodom procjene tipa B:

$$u_B(x_{G1}) = 0,053 \text{ dm}^3 \text{ za } 500 \text{ kg}$$

$$u_B(x_{G2}) = 0,051 \text{ dm}^3 \text{ za } 300 \text{ kg}$$

$$u_B(x_{G3}) = 0,050 \text{ dm}^3 \text{ za } 150 \text{ kg}$$

Kod ultrazvučnog mjerila greška rezolucije iznosi $\pm 1 \text{ dm}^3$, pa standardna mjerna nesigurnost metodom procjene tipa B iznosi:

$$u_{B,res} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,577 \text{ dm}^3$$

8.4.3. Kombinirana mjerena nesigurnost rezultata

Za gravimetrijsku i ultrazvučnu metodu kombinirana nesigurnost izračunava se iz jednadžbe (24).

Za rezultate pri nominalnom volumenu 500 dm^3 gravimetrijskom metodom:

$$u_c(y_{G1}) = \sqrt{u_A(x_{G1})^2 + u_B(x_{G1})^2} = \sqrt{1,06^2 + 0,053^2} = 1,06 \text{ dm}^3$$

Za rezultate pri nominalnom volumenu 300 dm^3 gravimetrijskom metodom:

$$u_c(y_{G2}) = \sqrt{u_A(x_{G2})^2 + u_B(x_{G2})^2} = \sqrt{0,14^2 + 0,051^2} = 0,15 \text{ dm}^3$$

Za rezultate pri nominalnom volumenu 150 dm^3 gravimetrijskom metodom:

$$u_c(y_{G3}) = \sqrt{u_A(x_{G3})^2 + u_B(x_{G3})^2} = \sqrt{0,17^2 + 0,050^2} = 0,18 \text{ dm}^3$$

Za rezultate pri nominalnom volumenu 500 dm^3 ultrazvučnom metodom:

$$u_c(y_{U1}) = \sqrt{u_A(x_{U1})^2 + u_B(x_{U1})^2} = \sqrt{3,18^2 + 0,577^2} = 3,23 \text{ dm}^3$$

Za rezultate pri nominalnom volumenu 300 dm^3 ultrazvučnom metodom:

$$u_c(y_{U2}) = \sqrt{u_A(x_{U2})^2 + u_B(x_{U2})^2} = \sqrt{1,15^2 + 0,577^2} = 1,29 \text{ dm}^3$$

Za rezultate pri nominalnom volumenu 150 dm^3 ultrazvučnom metodom:

$$u_c(y_{U3}) = \sqrt{u_A(x_{U3})^2 + u_B(x_{U3})^2} = \sqrt{0,58^2 + 0,577^2} = 0,82 \text{ dm}^3$$

8.4.4. Proširena mjerena nesigurnost rezultata

Proširena mjerna nesigurnost za gravimetrijsku i ultrazvučnu metodu može se izračunati iz kombinirane mjerne nesigurnosti iz jednadžbe (25).

Za rezultate pri nominalnom volumenu 500 dm³ gravimetrijskom metodom:

$$U(y_{G1}) = 2 \cdot u_c(y_{G1}) = 2 \cdot 1,06 = 2,12 \text{ dm}^3$$

Za rezultate pri nominalnom volumenu 300 dm³ gravimetrijskom metodom:

$$U(y_{G2}) = 2 \cdot u_c(y_{G2}) = 2 \cdot 0,15 = 0,30 \text{ dm}^3$$

Za rezultate pri nominalnom volumenu 150 dm³ gravimetrijskom metodom:

$$U(y_{G3}) = 2 \cdot u_c(y_{G3}) = 2 \cdot 0,18 = 0,36 \text{ dm}^3$$

Za rezultate pri nominalnom volumenu 500 dm³ ultrazvučnom metodom:

$$U(y_{U1}) = 2 \cdot u_c(y_{U1}) = 2 \cdot 3,23 = 6,46 \text{ dm}^3$$

Za rezultate pri nominalnom volumenu 300 dm³ ultrazvučnom metodom:

$$U(y_{U2}) = 2 \cdot u_c(y_{U2}) = 2 \cdot 1,29 = 2,58 \text{ dm}^3$$

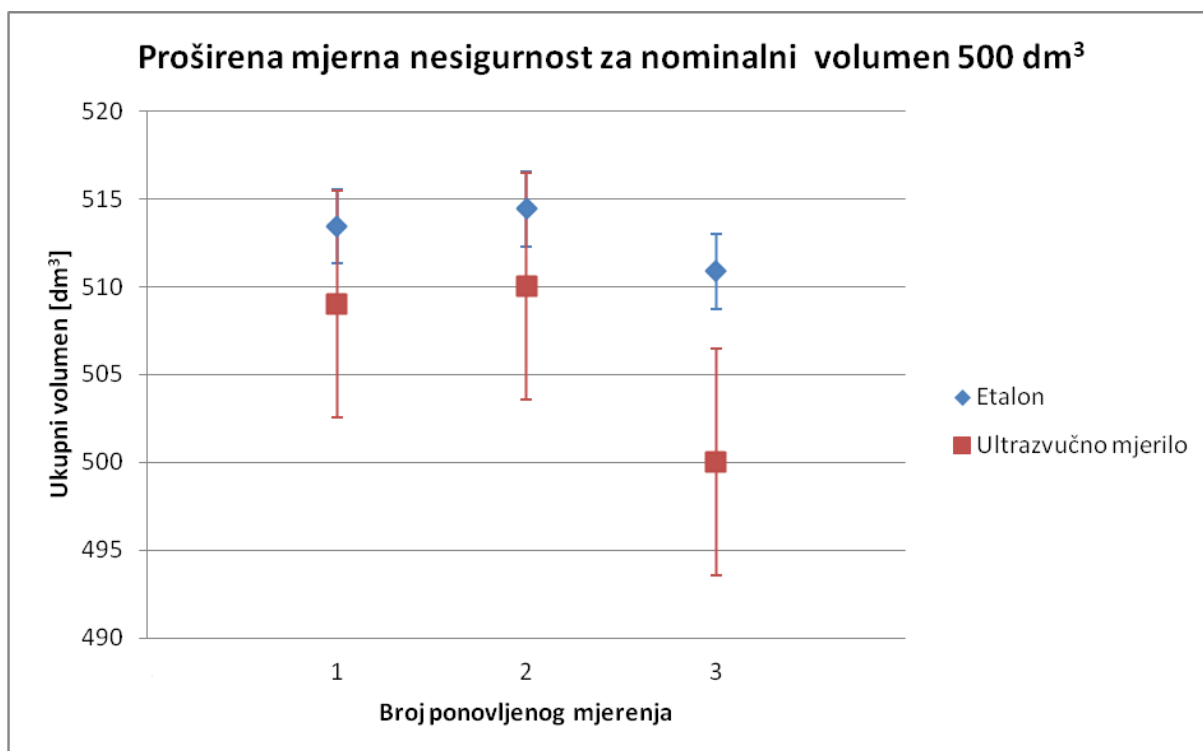
Za rezultate pri nominalnom volumenu 150 dm³ ultrazvučnom metodom:

$$U(y_{U3}) = 2 \cdot u_c(y_{U3}) = 2 \cdot 0,82 = 1,64 \text{ dm}^3$$

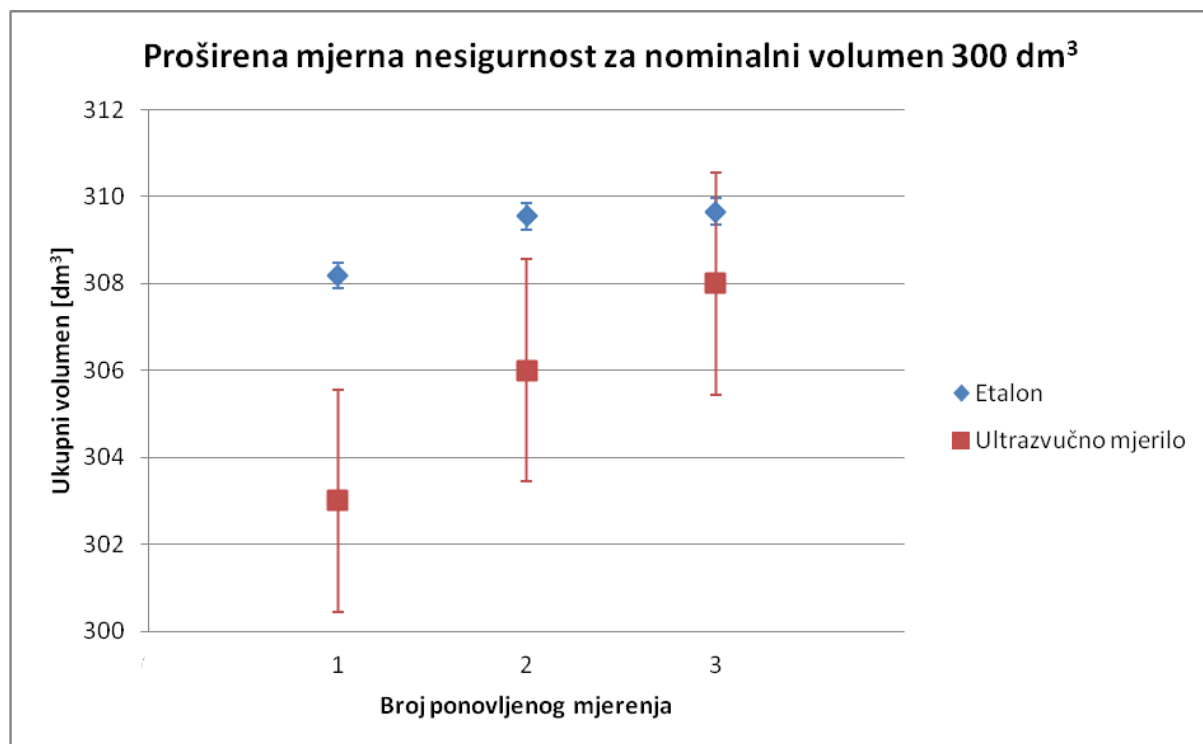
Tablica 7 prikazuje proširene mjerne nesigurnosti rezultata gravimetrijske metode i ultrazvučne metode mjerenja protoka, koje su zatim prikazane i grafički.

Tablica 7. Proširena mjerna nesigurnost

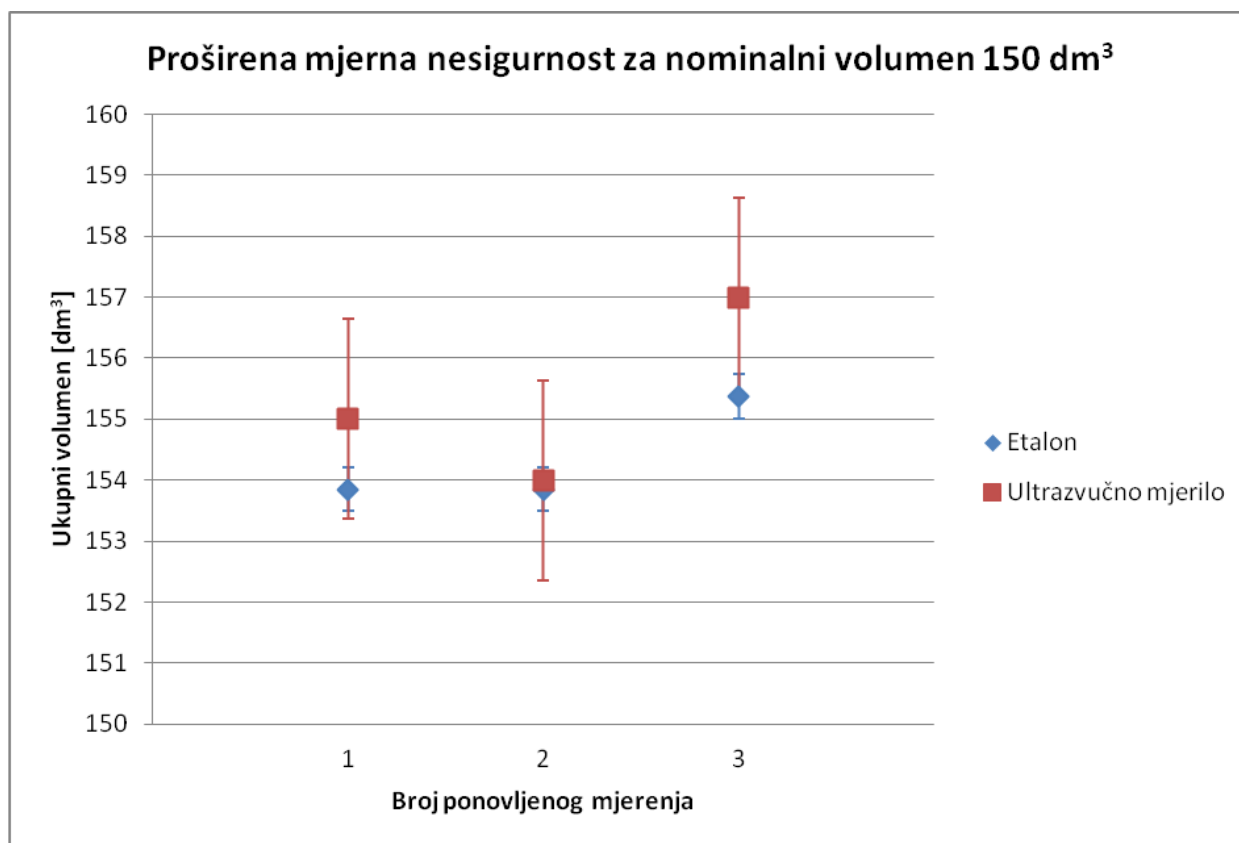
	Proširena mjerna nesigurnost U(y)	
	Etalon	Ultrazvučno mjerilo
	[dm ³]	[dm ³]
Nominalni volumen 500 dm³	2,12	6,46
Nominalni volumen 300 dm³	0,30	2,56
Nominalni volumen 150 dm³	0,36	1,64



Graf 12. Usporedba rezultata gravimetrijske i ultrazvučne metode s proširenom mjernom nesigurnosti za nominalni volumen 500 dm³



Graf 13. Usporedba rezultata gravimetrijske i ultrazvučne metode s proširenom mjernom nesigurnosti za nominalni volumen 300 dm³



Graf 14. Usporedba rezultata gravimetrijske i ultrazvučne metode s proširenim mjernom nesigurnosti za nominalni volumen 150 dm³

Usporedbom vrijednosti proširene mjerne nesigurnosti rezultata gravimetrijske i ultrazvučne metode mjerenja protoka za nominalne volumene od 500 i 150 dm³ može se vidjeti da iako postoje očekivana odstupanja rezultata ultrazvučne metode od rezultata gravimetrijske metode, proširena mjerna nesigurnost rezultata ultrazvučne metode se većinom poklapa sa proširenim mjernom nesigurnosti rezultata gravimetrijske metode. Nasuprot tome za nominalni volumen od 300 dm³ usporedbom vrijednosti proširene mjerne nesigurnosti rezultata vidljivo je da se proširena mjerna nesigurnost rezultata ultrazvučne metode većinom ne poklapa sa proširenim mjernom nesigurnosti rezultata gravimetrijske metode.

9. ZAKLJUČAK

Tema ovog rada bilo je ispitivanje ultrazvučnog mjerila protoka Ultrasonic Flowmeter RV-100H, proizvođača DaLian Zerogo Instruments, koje je kupljeno s namjenom korištenja pri terenskim mjerenjima protoka fluida u izmjenjivačima topline. Ispitivanje ultrazvučnog mjerila izvedeno je usporednim mjerenjem gravimetrijskom metodom na liniji JUSTUR G2T 90/50-100, u Laboratoriju za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Mjerenje je provedeno za tri vrijednosti nominalnih volumena, odnosno nominalnih volumnih protoka s tri ponovljena mjerenja za svaki protok. Dobiveni rezultati mjerenja prikazani su tablično i grafički. Kako niti jedno mjerenje nije potpuno bez procjene mjerne nesigurnosti za rezultate obje metode mjerenja izračunata je proširena mjerna nesigurnost rezultata, koja je zatim prikazana tablično i grafički. Usporedbom vrijednosti proširene mjerne nesigurnosti rezultata gravimetrijske i ultrazvučne metode mjerenja protoka za dva nominalna volumena proširena mjerna nesigurnost rezultata ultrazvučne metode se većinom poklapala sa proširenom mjernom nesigurnosti rezultata gravimetrijske metode. Nasuprot tome za treći nominalni volumen proširena mjerna nesigurnost rezultata ultrazvučne metode se većinom nije poklapala sa proširenom mjernom nesigurnosti rezultata gravimetrijske metode. Na kraju se može zaključiti da bi se ultrazvučno mjerilo protoka moglo koristiti za predviđenu namjenu za terenska mjerenja, uz napomenu da bi se očitane vrijednosti takvog mjerenja mogle koristiti jedino kao okvirne vrijednosti za grubu procjenu vrijednosti volumnog protoka. Ispitivano ultrazvučno mjerilo naime nije se pokazalo pogodno za primjenu kao glavno referentno mjerilo za terenska mjerila, niti kao mjerilo prigodno za korištenje u laboratoriju.

LITERATURA

- [1] Baker, R. C.: Flow Measurement Handbook, Cambridge University Press, 2000.
- [2] Hrgarek, P.: Metode i pogreške kod mjerenja protoka, završni rad, Zagreb, 2015.
- [3] Bolf, N.: Mjerenje malih protoka u laboratoriju i na postrojenju, Mjerna i regulacijska tehnika, Kem. Ind. 64 (1-2), Zagreb, 2015.
- [4] The Calibration of Flow Meters, National Measurement System, TUV NEL
www.tuvnel.com/_x90lbn/The_Calibration_of_Flow_Meters.pdf
- [5] Paton, R.: Calibration and Standards in Flow Measurement
eu.wiley.com/legacy/wileychi/hbmsd/pdfs/mm269.pdf
- [6] JUSTUR, Technical report and operation book, MT 10/15-40 and G2T 90/50-100, Stara Tura, 2005.
- [7] <https://www.amazon.com/TDS-100H-S1-Transit-Time-Ultrasonic-Calibration-Certificate/dp/B00DFH3VWO>
- [8] <http://zerogoflowmeter.gmc.globalmarket.com/products/details/ultrasonic-handheld-flow-meter-1641959.html>
- [9] OMNI-TUF-200H SERIES Portable Ultrasonic Flow Meter Users Manual, Omni Instruments
- [10] Bell, S.: A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement, Measurement Good Practice Guide No.11 (Issue 2), National Physical Laboratory, 2001.
- [11] Industrial Instrumentation - Flow http://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/instrumentation/Industrial_Instrumentation%20-%20Flow.pdf
- [12] Nastavni materijali iz kolegija "Mjerenja u energetici", FSB, 2013.
- [13] Inženjerski priručnik IP1, Školska knjiga, Zagreb, 1996.
- [14] Two Technologies for Flow Measurement from Outside a Pipe
<http://greyline.com/twotechnologies.htm>

PRILOZI

I. CD-R disc